



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

Year : 2016

Analyse de réseau piéton et gestion scolaire: sinuosité, centricité et transport optimal régularisé

Théophile Emmanouilidis

Théophile Emmanouilidis, 2016, Analyse de réseau piéton et gestion scolaire: sinuosité, centricité et transport optimal régularisé.

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive <http://serval.unil.ch>

Document URN : urn:nbn:ch:serval-BIB_6119C072B7146

Droits d'auteur

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

Copyright

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.

Analyse de réseau piéton et gestion scolaire: sinuosité, centricité et transport optimal régularisé

Thèse de doctorat

Présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de
l'Université de Lausanne par Théophile Emmanouilidis
Licence ès Lettres (Lausanne)

Jury

Prof. François BAVAUD, *Directeur de thèse* (Université de Lausanne)

Prof. honoraire Jean-Bernard RACINE, *Expert* (Université de Lausanne)

Directeur de Recherche au CNRS Didier JOSSELIN, *Expert* (Université d'Avignon)

Ancien Directeur du Service des écoles Gérard DYENS, *Expert* (Commune de Lausanne)

Maître d'enseignement et de recherche Christian KAISER, *Expert* (Université de Lausanne)

Sous la présidence du Professeur Suren ERKMAN (Université de Lausanne)

Lausanne 2016



UNIL | Université de Lausanne
Décanat Géosciences et de l'Environnement
bâtiment Géopolis
CH-1015 Lausanne

IMPRIMATUR

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

Président de la soutenance publique :	M. le Professeur Suren Erkman
Président du colloque :	M. le Professeur Suren Erkman
Directeur de thèse :	M. le Professeur François Bavaud
Expert interne :	M. le Prof. Honoraire Jean-Bernard Racine
Expert interne :	M. le Docteur Christian Kaiser
Expert externe :	M. le Docteur Didier Josselin
Expert externe :	Monsieur Gérard Dyens

Le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement autorise l'impression de la thèse de

Monsieur Théophile EMMANOUILIDIS

Titulaire d'une
Licence en Lettres
Université de Lausanne

intitulée

**ANALYSE DE RESEAU PIETON ET GESTION SCOLAIRE:
SINUOSITE, CENTRICITE ET TRANSPORT OPTIMAL
REGULARISE**

Lausanne, le 29 février 2016

Pour le Doyen de la Faculté des géosciences et
de l'environnement

Professeur Suren Erkman, Vice-doyen

"Analyse de réseau piéton et gestion scolaire : sinuosité, centricité, et transport optimal régularisé"

Emmanouilidis Théophile
Institut de géographie et durabilité (IGD), Université de Lausanne

Que ce soit d'un point de vue, urbanistique, social, ou encore de la gouvernance, l'évolution des villes est un défi majeur de nos sociétés contemporaines. En offrant la possibilité d'analyser des configurations spatiales et sociales existantes ou en tentant de simuler celles à venir, les systèmes d'information géographique sont devenus incontournables dans la gestion et dans la planification urbaine. En cinq ans la population de la ville de Lausanne est passée de 134'700 à 140'570 habitants, alors que les effectifs de l'école publique ont crû de 12'200 à 13'500 élèves. Cet accroissement démographique associé à un vaste processus d'harmonisation de la scolarité obligatoire en Suisse ont amené le Service des écoles à mettre en place et à développer en collaboration avec l'université de Lausanne des solutions SIG à même de répondre à différentes problématiques spatiales. Établies en 1989, les limites des établissements scolaires (bassins de recrutement) ont dû être redéfinies afin de les réadapter aux réalités d'un paysage urbain et politique en pleine mutation. Dans un contexte de mobilité et de durabilité, un système d'attribution de subventions pour les transports publics basé sur la distance domicile-école et sur l'âge des écoliers, a été conçu. La réalisation de ces projets a nécessité la construction de bases de données géographiques ainsi que l'élaboration de nouvelles méthodes d'analyses exposées dans ce travail. Cette thèse s'est ainsi faite selon une dialectique permanente entre recherches théoriques et nécessités pratiques.

La première partie de ce travail porte sur l'analyse du réseau piéton de la ville. La morphologie du réseau est investiguée au travers d'approches multi-échelles du concept de centralité. La première conception, nommée sinuo-centralité (*"straightness centrality"*) (fig. 1, I), stipule qu'être central c'est être relié aux autres en ligne droite. La deuxième, sans doute plus intuitive, est intitulée centricité (*"closeness centrality"*) et exprime le fait qu'être central c'est être proche des autres (fig. 1, II). Les méthodes développées ont pour but d'évaluer la connectivité et la marchabilité du réseau, tout en suggérant de possibles améliorations (création de raccourcis piétons).

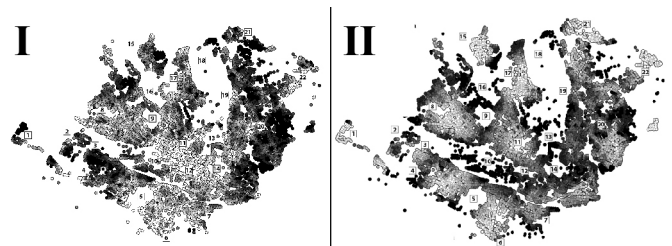


Figure 1 I : Sinuo-centralité, II : Centricité

Le troisième et dernier volet théorique expose et développe un algorithme de transport optimal régularisé. En minimisant la distance domicile-école et en respectant la taille des écoles, l'algorithme permet de réaliser des scénarios d'enclassement (fig. 2, I). L'implémentation des multiplicateurs de Lagrange offre une visualisation du "coût spatial" des infrastructures scolaires et des lieux de résidence des écoliers (fig. 2, II).

La deuxième partie de cette thèse retrace les aspects principaux de trois projets réalisés dans le cadre de la gestion scolaire. À savoir : la conception d'un système d'attribution de subventions pour les transports publics, la création de nouveaux bassins de recrutement scolaires (fig. 2, III), ou encore la simulation des flux d'élèves se rendant à l'école à pied (fig. 2, IV).

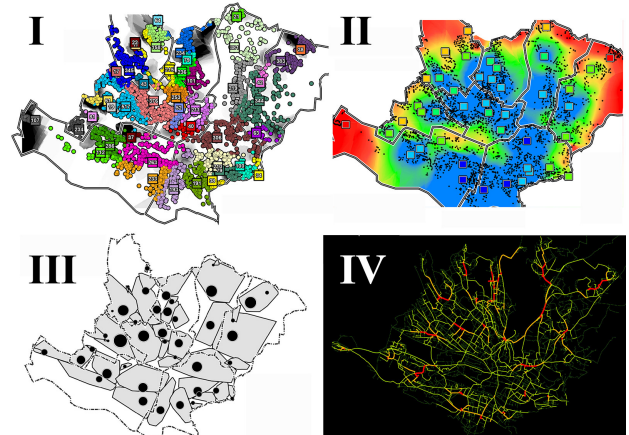


Figure 2 I) Simulation d'enclassement, II) Multiplicateurs de Lagrange, III) Constructions d'établissements scolaires, IV) Simulation de flux d'écoliers

"Pedestrian network analysis: sinuosity, centrality, and regularized optimal transport"

Emmanouilidis Théophile
Institut de géographie et durabilité (IGD), Université de Lausanne

May it be from an urbanistic, a social or from a governance point of view, the evolution of cities is a major challenge in our contemporary societies. By giving the opportunity to analyse spatial and social configurations or attempting to simulate future ones, geographic information systems cannot be overlooked in urban planning and management. In five years, the population of the city of Lausanne has grown from 134'700 to 140'570 inhabitants while the numbers in public schools have increased from 12'200 to 13'500 students. Associated to a considerable harmonisation process of compulsory schooling in Switzerland, this demographic rise has driven schooling services, in collaboration with the University of Lausanne, to set up and develop GIS capable of tackling various spatial issues.

Established in 1989, the school districts had to be altered so that they might fit the reality of a continuously changing urban and political landscape. In a context of mobility and durability, an attribution system for public transport subventions based on the distance between residence and school and on the age of the students was designed. The implementation of these projects required the built of geographical databases as well as the elaboration of new analysis methods exposed in this thesis.

The first part of this work focuses on the analysis of the city's pedestrian network. Its morphology is investigated through multi-scale approaches of the concept of centrality. The first conception, named the straightness centrality (fig 1, I), stipulates that being central is being connected to the others in a straight line. The second, undoubtedly more intuitive, is called closeness centrality and expresses the fact that being central is being close to the others (fig 1, II). The goal of the methods developed is to evaluate the connectivity and walkability of the network along with suggesting possible improvements (creation of pedestrian shortcuts).

The third and final theoretical section exposes and develops an algorithm of regularised optimal transport. By minimising home to school distances and by respecting school capacity, the algorithm enables the production of student allocation scheme (fig 2, I). The implementation of the Lagrange multipliers offers a visualisation of the spatial cost associated to the schooling infrastructures and to the student home locations (fig2, II).

The second part of this thesis recounts the principal aspects of three projects fulfilled in the context of school management. It focuses namely on the built of an attribution system for public transport subventions, a school redistricting process (fig 2, III) and on simulating student pedestrian flows (fig 2, IV).

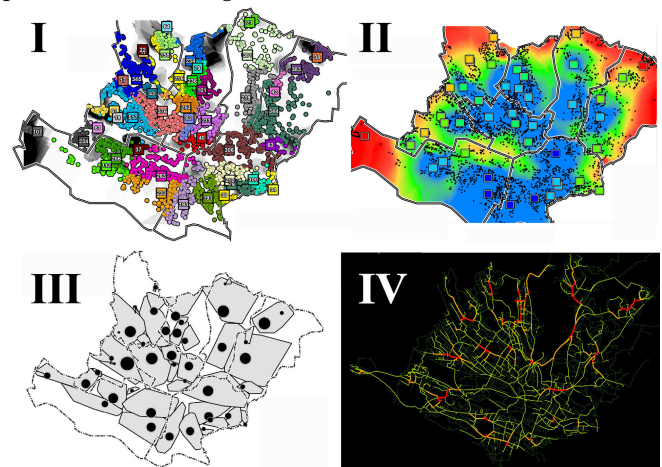


Figure 2 I) Students allocation, II) Lagrangian Multipliers, III) School redistricting, IV) Student pedestrian flows

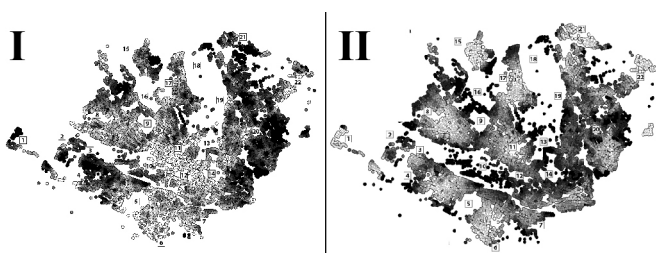


Figure 1 I: straightness (I) & closeness (II) centrality

Remerciements

Université de Lausanne, Faculté des Géosciences et de l'environnement et Faculté des Lettres: *F.Bavaud, M. Curchod, C.Kaiser, J-B Racine, E. Reynard.*

Aux experts de cette thèse.

À mes collègues de bureau: *Christelle, Davide, Guillaume, Mattia.*

À la Ville de Lausanne: *A. Abdennacer, P.Brandt, Y. Deillon, G. Dyens, A. Iannuzzi, C. Imbach, P. Jolliet, P. Martinet, S. Pittet, D. Savary.*

À ma famille: *Xénophon, Marinette, Alexandre, Lina, Séverine, Damien, Rose, Augustine, Léonard, Zéphyrin.*

À mes amis les hommes diahr et amies: *Amy, Carlo, David, Edu, Jérémy, Laura, Lux, Raoul, Vanessa, Vinh et tous les autres.*

Au Reighikan Dojo.

Table des matières

	Page
Introduction générale	xv
I Organisation de la thèse	xvii
II Sources et descriptif des données	xxi
II.I Données cadastrales et démographiques (CADA + CH)	xxii
II.II Données scolaires	xxiii
II.III Droits d'utilisation des données de la Ville	xxiii
III Remarques et notations générales	xxv
 Première partie : Analyse du réseau piéton et transport optimal régularisé	 3
Introduction	3
1 Sinuosité et sinuo-centralité	5
1.1 Évaluation de l'interconnectivité des bâtiments	6
1.1.1 Diagrammes de dispersion à tendance linéaire	7
1.1.2 Diagrammes de dispersion à tendance non-linéaire	10
1.1.3 Évaluation de la connectivité entre deux quartiers	13
1.1.4 Détection et simulation de raccourci(s)	13
1.2 Connectivité d'un bâtiment au réseau piétonnier avoisinant	14
1.3 Indice de sinuosité et sinuo-centralité	17
1.3.1 Analyses et résultats	18
1.4 Perspectives et conclusion	23
1.4.0.1 Géométrie et sinuosité d'itinéraire(s)	23
1.4.0.2 Réseau orienté	25

2	Centralité de proximité : centricité(s) et eccentricité(s)	29
2.1	Indices de centricité et d'eccentricité	30
2.2	Centricité : fonctions décroissantes de la distance $F(d)$	32
2.3	Eccentricité : fonctions croissantes de la distance $G(d)$	36
2.3.1	Résultats par quartier	39
2.3.2	Résultats par distance de marche maximale	40
2.4	Indices de détour	42
2.5	Perspectives et conclusion	45
3	Transport optimal régularisé	49
3.1	Formalisme	50
3.1.1	Régularisation et entropie	51
3.1.2	Multiplicateurs de Lagrange	52
3.2	Illustrations sur une grille	54
3.3	Notes computationnelles	56
3.4	Transport optimal non-contraint (k-médoïdes)	61
3.5	Perspectives et conclusion	61
 Seconde partie : Projets SIG dans le cadre de l'organisation et de la gestion scolaire		67
Introduction		67
4	Système d'attribution d'abonnements de bus pour les écoliers	75
4.1	Historique	75
4.2	Subventions 2010-2013	79
4.3	Aspects techniques et réalisation	80
5	Création d'établissements scolaires et modélisation d'enclassement	84
5.1	Redéfinition des établissements primaires	85
5.1.1	Situation initiale	85
5.1.2	Principes et lignes directrices	85
5.1.3	Méthodologie et zones d'attente	88
5.1.4	Étude préliminaire	89
5.1.5	Délimitation d'établissement par k-means	91

5.2	Modélisation d'enclassement tous niveaux scolaires confondus (1P à 6P)	92
5.3	Modélisation d'enclassement par niveau scolaire	94
5.3.1	Résultats finaux	96
5.3.2	Multiplicateurs de Lagrange par niveau scolaire	99
5.4	Modélisation et réalité	101
5.4.1	Proximité de scolarisation	104
5.4.2	Impact théorique des contraintes de capacité	106
5.5	Conclusion	107
6	Simulation des flux domicile-école	109
7	Évaluation de la localisation d'une nouvelle école en périphérie communale.	113
7.1	Analyses spatiales du site de la future école	114
7.2	Statistiques sur les distances domicile-école des élèves lausannois (par niveau scolaire)	115
7.3	Délimitation de la zone d'étude et dynamiques existantes	116
7.4	Prévision de la population scolaire jusqu'en 2017 et synthèse	119
8	Conclusion	121
	Bibliographie	125
	Conférences, publications, et rapports à la Ville	133
	Annexes	137
	Descriptif	137
A	Nouvelle politique en matière de transports scolaires et d'encouragement des jeunes de moins de 20 ans à l'utilisation des transports publics (G.Dyens 2009)	139
B	Organisation des établissements scolaires de la région Lausanne à l'horizon 2015-2020. <i>Rapport final sur la proposition de mise en œuvre LEO/Harmos</i> (G.Dyens, 2012)	153
C	Limites d'établissements par k-means (T.E, 2011)	167
D	Étude des établissements scolaires primaires lausannois (T.E, 2011)	173
E	Scénarios et esquisses d'établissements Harmos 1-8 (T.E, 2012)	181

Introduction générale

Étymologiquement le géographe, du grec *géo-* la Terre et *graphé* l'art d'écrire, est celui qui écrit, décrit et dessine le monde. Si le géographe dessine le monde, l'idée de Vermeer de dessiner le monde du géographe est en soi fort ingénieuse et fort instructive. Sur cette toile de l'an 1'669, on peut voir un homme, le regard tourné résolument vers l'extérieur. La courbure de son corps associée aux nombreuses lignes verticales de la scène accentue son intentionnalité vers le dehors. En étant figuré au centre de la peinture, il occupe le centre de son monde. On notera au passage que l'intersection des diagonales de la toile coïncide avec le cœur du personnage. En observant depuis l'intérieur d'une bâtisse il a un regard lointain sur le monde. Une vision qui s'imprègne des carreaux des fenêtres,

une grille qui découpe l'espace en latitudes et longitudes. Hormis les plis et les vagues de la couverture, les autres éléments de la pièce sont faits de géométries simples et épurées allant de la ligne (les plans au sol, le "crayon" sur la tablette, les bordures des fenêtres,..) au carré, ou au rectangle (la chaise, l'armoire, le tableau,..). Le compas par sa forme triangulaire donne quant à lui l'impression d'un double mouvement. On peut le voir comme une "tête de flèche" pointant vers l'extérieur et soutenant le regard du préhenseur. À l'inverse, les branches du compas, d'un écart similaire à l'écartement des yeux du géographe, sont tournées vers l'intérieur et suggèrent ainsi un mouvement



FIGURE 1 *Le Géographe* par Vermeer
(source : Wikipedia)

vers le dedans. Les jeux de luminosité de l'ensemble de la peinture sont subtils et loin d'être anodins. En tant que figure centrale, le géographe est éclairé. Mais pas n'importe comment: entre lumière et ombre son visage est à la fois tourné vers le dehors et le dedans, à mi-chemin entre observation et réflexion. Son bras et sa main droite ainsi que le compas sont en pleine lumière. Ils mettent ainsi en avant son savoir-faire et sa technique, alors que son bras gauche lui assure assise et stabilité. Les éléments les plus exposés sont incontestablement ses œuvres qui, devant comme derrière lui, brillent de mille feux. Ainsi, le géographe est celui qui est capable de retranscrire sur une carte la lumière du monde pour, justement, le mettre en lumière. Comme par écho du monde extérieur, le géographe est surplombé d'une sphère à laquelle s'adjoint la connaissance de quelques livres. Le globe inscrit dans un référentiel cartésien est le témoin d'un long processus: celui de la géométrisation et de la mathématisation du monde.

“Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre”

Les mathématiques ont incontestablement marqué l'esprit des penseurs de l'Antiquité par leur caractère d'universalité. Par exemple dans la République (VII, 527b) Platon dit que la géométrie est *“connaissance de ce qui est toujours, et non pas de ce qui à un moment ou un autre naît et meurt”*. Ce qui est toujours ce sont les Idées, accessibles par l'intellect, au travers de la contemplation: la *théoria*. Les Idées servent de modèles au demiurge. Il les utilise pour façonner et organiser la matière, pour engendrer le monde sensible, c'est-à-dire la réalité telle que perçue par nos sens. Pour le bonheur des citoyens athéniens, les Idées du Bien, du Beau et du Vrai animent la Cité idéale. Toutes trois sont comme sous-jacentes à la *théoria*, à la *praxis* “l'acte de faire” et à la *poiésis* “l'acte de fabriquer”. Vers elles se tournent autant les académiciens, les praticiens que les politiciens.

Bien qu'il soit possible de dessiner une infinité de triangles, l'idée du triangle en elle-même est universelle: unique, immuable, et vraie. Le passage des Idées au monde sensible se fait ainsi au travers d'un “mouvement” allant de l'universel au particulier. Pour les pythagoriciens, l'universel est l'Un, c'est l'unité qui est à la source de multiplicité. Selon leur conception, du nombre “1” découle tous les nombres entiers, ils sont la source de la nature, la matrice génératrice et harmonisatrice d'un monde où tout est nombres. Force est de constater qu'il aura fallu près de 2500 ans d'avancée des sciences, des techniques et des sociétés pour assister, d'une certaine façon, à l'avènement de la théorie pythagoricienne dans ce qu'on appelle le monde numérique.

Aussi trivial que cela puisse paraître, pour qu'un objet puisse être incarné dans le monde numérique, il doit être numérisable. Par leur nature éminemment spatiale, les objets de la géographie aussi bien physique que humaine se prêtent de ce fait plutôt bien à cette opération. Cette transposition de la réalité dans le virtuel permet d'immerger le monde sensible dans l'univers mathématiques pour lui y appliquer et développer des méthodes et des modèles dont les finalités sont multiples: visualiser, analyser, organiser, planifier, ou encore simuler des configurations spatio-temporelles. Si les nombres sont à la source du monde qui nous entoure, l'homme est parvenu à renvoyer le monde dans l'univers des vérités mathématiques.

Cela est d'une certaine façon illustrée par l'Astronome de Vermeer. Si le Géographe observe le monde pour le mettre en lumière, alors l'Astronome ne regarde pas la lumière des astres, mais les modèles lumineux qui se tiennent devant lui: le globe céleste et l'astrolabe. Ce dernier permet non seulement de mesurer la hauteur des astres et de lire l'heure, de jour comme de nuit, mais également de calculer la position des étoiles les unes par rapport aux autres, ou encore d'estimer l'heure du lever et du coucher du soleil. Cette invention, comme bien d'autres, témoigne de la capacité de l'homme à transférer certaines parties de son intellect dans un dispositif qui lui est extérieur. Une démarche qui l'amènera quelques siècles plus tard au développement d'intelligences artificielles incarnées dans des ordinateurs, des ordonnateurs qui se tiennent et se tiendront au cœur de villes intelligentes: le paradigme d'une Cité idéale cybernétique.



FIGURE 2 *L'Astronome* par Vermeer
(source : Wikipedia)

I Organisation de la thèse

Le présent travail va de l'un au multiple. D'un même jeu de données, le réseau piétonnier d'une ville, son "graphe", émergent de multiples approches et méthodes relevant à la fois de la *théoria* et de la *praxis*. La démarche générale de cette thèse est

de proposer des méthodes originales de modélisation des domaines de la théorie des graphes et de la recherche opérationnelle, et de leur trouver une utilité concrète dans la planification urbaine ou scolaire. Cette thèse est le fruit d’une étroite collaboration initiée en 2007, entre trois sphères: l’université, les services administratifs, et plus indirectement, les institutions politiques de la ville de Lausanne. Les rôles que jouent ces trois sphères et les responsabilités sociales qui leurs sont confiées ne sont pas les mêmes. Elles se distinguent également les unes des autres par leur rythme et leurs environnements de travail ainsi qu’au travers de leur langage. Malgré leurs différences, toutes trois ont vocation à œuvrer en faveur d’un bien commun. Toute démarche inter-, pluri- ou trans-disciplinaire nécessite de comprendre et définir les attentes et les enjeux de chacun pour pouvoir établir un cadre fonctionnel et réaliste amenant, on l’espère, à la satisfaction de tous. Dans cette optique, l’enjeu de cette thèse est de proposer des approches et des méthodes théoriques novatrices, appliquées dans un contexte opérationnel par l’étude et la conception de solutions administrativement fonctionnelles, pertinentes, et politiquement acceptables.

La thèse est divisée en trois parties schématiquement illustrées dans la figure 3 et pouvant être décrites comme suit :

1. *La première, intitulée “Analyse de réseau piéton et transport optimal régularisé”,* expose, dans l’ordre chronologique de leur réalisation, les recherches scientifiques portant à la fois sur la théorie des graphes et sur la recherche opérationnelle. Le but des deux premiers chapitres est d’investiguer les patterns et la morphologie du réseau piéton de Lausanne. Le premier chapitre est consacré à l’étude du concept de sinuosité en milieu urbain. Ce concept, mettant en rapport la distance du plus court chemin avec la distance euclidienne, est tout d’abord utilisé pour évaluer la connectivité du réseau tout en suggérant de possibles améliorations (création de raccourcis). Puis il est utilisé pour calculer différents indices de marchabilité (*“pedshed”*), de détour, ou encore de sinuocentralité (*“straightness centrality”*) stipulant qu’être central c’est être relié aux autres en ligne droite.

Le deuxième chapitre porte quant à lui sur le concept de proximité. Il renvoie à une définition plus intuitive de la centralité où être central c’est être proche des autres. L’utilisation de fonctions croissantes et décroissantes de la distance permet de définir des indices de centricité (*“closeness centrality”*) et d’eccentricité. L’ensemble des indices proposés dans les deux premiers chapitres peuvent être calculés à échelle locale (nœud du réseau) ou régionale (ensemble de nœuds) et sont applicables à un réseau orienté. La population résidant dans les bâtiments

peut être utilisée pour pondérer les indices.

Le troisième et dernier volet théorique propose de revisiter le problème du transport optimal au travers d'un mécanisme de régularisation basé sur l'information mutuelle entre origine et destination. Conçu est développé pour répondre à une problématique concrète, la redéfinition d'établissements scolaires, l'algorithme permet d'attribuer les élèves aux différentes écoles de la ville en minimisant la distance domicile-école et en respectant la taille des écoles. Il permet également de cartographier les zones optimales de recrutement de chaque école et de mettre en avant les frontières qui les séparent. L'implémentation des multiplieurs de Lagrange offre une visualisation du "coût spatial" des infrastructures scolaires et des lieux de résidence des écoliers.

2. *La seconde, intitulée "Projets SIG dans le cadre de l'organisation et de la gestion scolaire"*, retrace quatre projets ou études réalisés pour répondre à diverses problématiques spatiales inhérentes à la vie scolaire lausannoise. Le chapitre 4 est lié à la thématique des transports scolaires. Il développe la conception et la réalisation d'un projet visant à attribuer aux élèves des subventions pour les transports publics sur la base de leur âge et de leur distance domicile-école. Le chapitre 5 relate un long et complexe processus de redéfinition des limites des établissements primaires. Les deux derniers, de moindre envergure, proposent de visualiser les flux théoriques des trajets domicile-école (chap.6), alors que le chapitre 7 est consacrée à l'approche utilisée pour évaluer la localisation de nouvelles écoles en périphérie communale. Au vu de la diversité et de la différence d'amplitude de ces projets, on s'en tiendra principalement aux aspects méthodologiques et techniques.
3. La troisième, les annexes, apporte des compléments d'information sur les projets en y relatant notamment leurs dimensions politique, économique ou encore historique, pas forcément abordées dans le texte central.

La suite de cette introduction propose dans un premier temps d'exposer les données sous-jacentes à l'ensemble de ce travail, puis dans un deuxième temps, la section III est l'occasion d'évoquer quelques remarques méthodologiques et de définir les notations mathématiques générales.

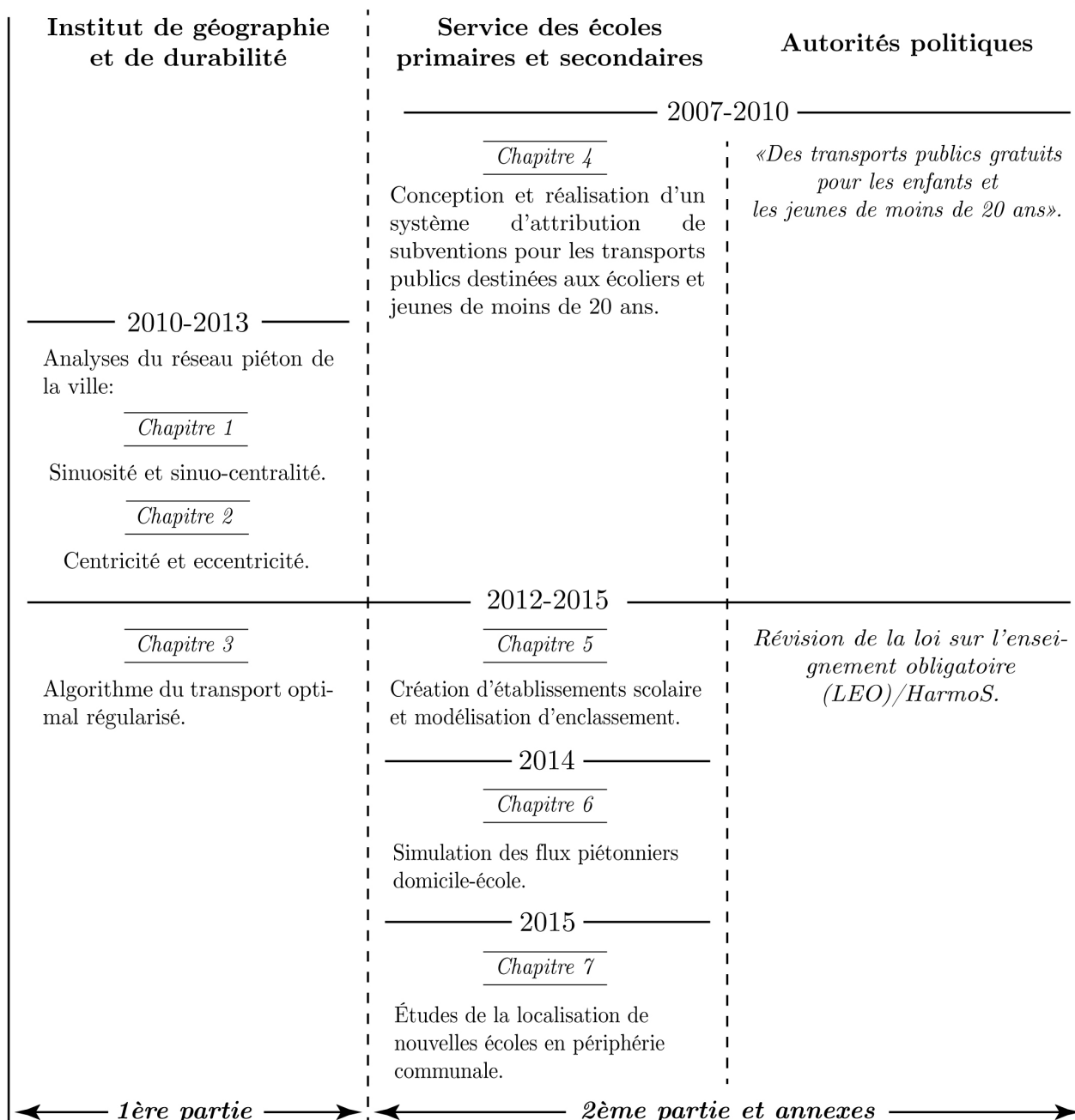


FIGURE 3 Plan et chronologie de thèse.

II Sources et descriptif des données

Avant d'en venir aux données elles-mêmes et à la description de leur construction, il est nécessaire d'évoquer le contexte informatique de leur création. Au niveau de la gestion scolaire, le contexte informatique a été passablement mouvementé avec le lancement du projet SIEF (2006) devant permettre de gérer les données des écoles et de les centraliser au niveau cantonal. Ce fût un échec et le SIEF a été totalement abandonné en 2009 en conséquence de quoi, la ville de Lausanne a dû maintenir et développer son propre système de gestion. En raison de la nécessité de trouver une solution pour gérer et coordonner la gestion ses 13'000 élèves, les services administratifs ont été fortement intéressés par le potentiel que représentait le géo-référencement des élèves et des infrastructures scolaires. Cet intérêt s'est concrétisé pour répondre à une demande politique souhaitant une gestion des transports scolaires favorisant l'utilisation des transports publics. Mandaté par le service des écoles primaires et secondaires (SEPS) nous avons suggéré de réaliser des polygones de subventions autour des écoles. Cette approche ne pouvant se faire raisonnablement que sur la base d'un outil de calcul des distances domicile-école, le SEPS a, avec notre collaboration, initié des synergies avec le service de la coordination et du cadastre (CADA) et avec le SOI (service d'organisation et d'informatique) afin de générer les géodonnées nécessaires à la mise en place d'un tel outil. Le géoréférencement des données scolaires et du réseau piétonnier a rapidement ouvert de nouveaux champs d'études théoriques et se sont étendus à d'autres aspects de la gestion scolaire : évaluation de la proximité scolaire, organisation et optimisation spatiale des rentrées, simulation d'enclassement, études d'impact, ou encore planifications démographiques à moyen terme.

Administrativement et techniquement, le service du cadastre est responsable des géodonnées de la ville¹. Il s'occupe du géoréférencement des données de population résidente provenant du service du contrôle des habitants (CH), ainsi que des données scolaires gérées par le SEPS. Informatiquement chaque service possède son ou ses propres systèmes de gestion et ses logiciels faisant que les bases de données évoluent bien souvent de manière indépendante. Comme suggéré en début de paragraphe, l'environnement informatique du SEPS a été marqué par de lourds changements ces dernières années. Le dernier en date concerne le passage de la gestion des données scolaires d'une échelle communale à une centralisation cantonale. Le nouveau système (LAGAPEO) ne contient pas l'entièreté des fonctionnalités de l'ancien (LAGAPERL), et ne propose pour l'instant aucun géoréférencement. Cette situation fait que le SEPS

1. La majorité d'entre elles peuvent être visualisées sur le guichet cartographique : <http://map.lausanne.ch/>

fonctionne actuellement sur deux systèmes de gestion. En sept ans de collaboration, les processus nécessaires à la création des jeux de données exposés dans les sous-sections suivantes ont passablement changé, et on précisera ainsi que les éléments présentés dans la figure 4 (p.xxiv) correspondent à l'organisation actuelle. Au-delà des systèmes de gestion de l'administration, l'évolution des systèmes d'information géographique a notamment été marquée par l'émergence et le développement SIG open-source de plus en plus fiables, et sans doute, de plus en plus utilisées par l'administration publique. La ville de Lausanne en est l'exemple puisque actuellement la majorité des logiciels visant à gérer, analyser et visualiser les géodonnées sont open-source.

II.I Données cadastrales et démographiques (CADA + CH)

Réseau piétonnier lausannois

Dans le but de pouvoir calculer les distances domicile-école, la création du réseau piétonnier de Lausanne (fig.4, VII) a été initiée en 2007. À ce moment-là, les données Opensource, du type OpenStreetMap, étaient inexistantes ou très lacunaires. Le cadastre disposait toutefois des données commerciales de TeleAtlas. Destiné à une utilisation routière, le tracé du réseau piéton était très incomplet. On entend par réseau piéton, l'ensemble des rues, des chemins et des places pouvant être parcourus à pied sans avoir à enjamber d'obstacle. Pour pallier aux manques des données TeleAtlas, un projet visant à corriger et à répertorier l'ensemble des chemins piétons de la ville a été mené. Pour identifier lesdits chemins, le territoire a été scruté au travers de photographies aériennes, de plans cadastraux ou encore de Google Streetview (à ses débuts...). Cette approche à distance a toutefois dû être associée à un travail de terrain conséquent. Environ une année et demi de collaboration entre le CADA, le SEPS et le SOI ont été nécessaires pour créer le réseau de l'ensemble de la ville. Initialement conçu dans une base Oracle par le SOI, il a ensuite été migré dans une base PostGIS (CADA) et vers ArcGIS où nous l'avons corrigé et mis à jour jusqu'à aujourd'hui. À l'heure actuelle il a une longueur totale de 589 km, les données TeleAtlas et les compléments piétonniers représentant respectivement 407 km et 182 km de cette longueur. Malgré le relief marqué de la ville, le réseau n'a pas été associé à un modèle numérique de terrain et les pentes ne sont pas prises en compte. Pour l'ensemble des travaux présentés, le réseau est utilisé pour mesurer des distances, chaque arête est ainsi évaluée par sa longueur. L'utiliser pour évaluer des temps de parcours en y intégrant le réseau de transports publics est une perspective intéressante et complexe.

Points adresse et population résidente

Les points adresse de la ville (fig.4, I) représentent l'ensemble des bâtiments, qu'ils soient ou non habités. Un travail long et méticuleux a été nécessaire pour relier correctement les points adresse au réseau. Il est possible de connaître la population résidant dans chacun des bâtiments grâce à un lien avec la base de données du contrôle des habitants. Ces informations sont stockées dans une base de données nommée "Goéland" dont les mises à jour sont très régulières. Les données de population résidente ont aussi bien été utiles pour les recherches théoriques que dans la pratique pour par exemple planifier la rentrée des jeunes nouveaux élèves.

II.II Données scolaires

Géoréférencement du domicile des élèves et des infrastructures scolaires

La base Goéland est utilisée pour géoréférencer les élèves (fig.4, II) et les bâtiments scolaires (III). Cette opération s'effectuant notamment sur la base de l'adresse des lieux de résidence des élèves, un important travail d'uniformisation de l'orthographe et des abréviations des adresses utilisées par le SEPS a dû être accompli. La base de données des élèves contient une multitude d'informations personnelles et d'autres inhérentes à leur scolarisation (école, niveau scolaire, numéro de classe,...). Les bâtiments scolaires sont répertoriés dans une autre base contenant notamment la capacité d'accueil de chacun d'eux. Un regroupement de deux ou plusieurs bâtiments constitue un complexe ou un site scolaire.

Limites des établissements primaires et secondaires

Les élèves se répartissent au sein de cinq établissements de niveau primaires (IV) et de sept de niveau secondaires (VI). Depuis la rentrée 2015 ils sont répartis dans huit établissements primaires (V) et dans sept établissements mixtes primaires-secondaires (VI). Un établissement comprends plusieurs bâtiments ou complexes scolaires.

II.III Droits d'utilisation des données de la Ville

Le Service de la coordination et du cadastre et le Service des écoles primaires et secondaires de la Ville de Lausanne sont propriétaires des données exposées ici. Ces deux services ont donné l'autorisation de l'usage de ces données uniquement dans le cadre de la présente thèse. On mentionnera également l'utilisation de la carte nationale n°1243 de Swisstopo.

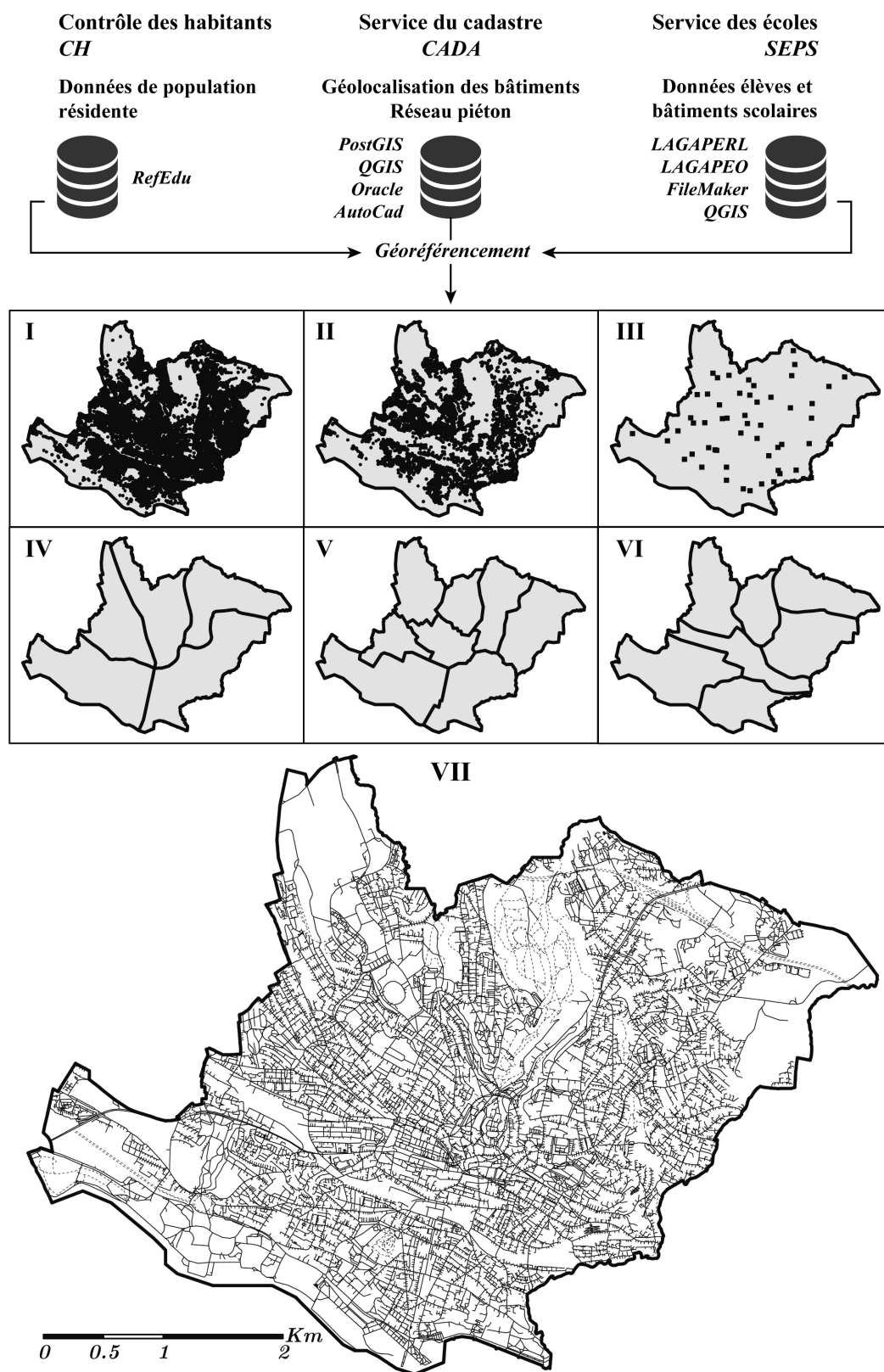


FIGURE 4 Sources et illustrations des données principales. I : bâtiments de la ville habités ou non, II : lieux de résidence des élèves, III : bâtiments scolaires, IV-VI : établissements scolaires primaires avant (IV) et après (V) août 2015, et secondaires (VI), VII : réseau piétonnier.

III Remarques et notations générales

Cette section définit le formalisme et précise quelques aspects méthodologiques généraux.

- L'ensemble des analyses à venir reposent sur le calcul de distances du plus court chemin entre les \mathcal{N} nœuds du réseau. Ce dernier compte actuellement 21'786 nœuds pour 24'739 arêtes totalisant une distance totale de 589 km. Les nœuds sont de deux natures différentes :
 - Intersections de routes et/ou de chemins piétonniers représentant des lieux de transit (12'215).
 - Les N bâtiments de la ville (points adresse) habités (7'781) ou non (9'571). Il est possible que plusieurs points adresse soient attribués à un seul bâtiment. Dans le cas où une même entrée donne accès à plusieurs routes, le point adresse est relié à la route à laquelle il est cadastralement rattaché. Cela permet d'éviter de simuler des itinéraires traversant des halls d'entrée.
- Les données scolaires ou de population associées aux bâtiments définissent le poids relatif f_i de chaque nœud, soit la proportion d'élèves ou de personnes habitant en i : $f_i = N_i / \sum_j N_j$, avec $f_i \geq 0$ et $\sum_{i=1}^N f_i = 1$. La pondération uniforme est donnée par $f_i = 1/N$.
- Chaque école g a une capacité d'accueil absolue de R_g , et une capacité relative $\rho_g := R_g / \sum_h R_h$.
- d_{ij}^e , d_{ij}^{sp} désignent respectivement la distance euclidienne et la distance du plus court chemin (*sp* : "shortest path") entre les nœuds i et j (un point adresse) ou g (une école). Selon le contexte, d_{ij} désignera soit d_{ij}^e , soit d_{ij}^{sp} .
- Les analyses peuvent être limitées à une région A définie soit par un polygone de surface $\mathcal{S}(A)$, soit par une région $A_i^e(c)$, $A_i^{sp}(c)$ engendrée par un buffer de distance c centré en i définie comme $A_i^e(c) := \{j | d_{ij}^e \leq c\}$, $A_i^{sp}(c) := \{j | d_{ij}^{sp} \leq c\}$ (fig.5) générant à une nouvelle distribution f^A

$$f_i^A := \frac{1(i \in A) f_i}{\sum_{j \in A} f_j} \quad \text{où} \quad 1(E) := \begin{cases} 1 & \text{si l'événement } E \text{ est vrai} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (1)$$

Au final les analyses portent sur le sous-ensemble de nœuds \mathcal{N}^A situés à l'intérieur de la région A . Afin d'éviter l'isolement d'un ou de plusieurs nœuds situés en bordure de région, le réseau est toujours utilisé dans son ensemble et n'est donc pas restreint aux limites de la région. Autrement dit, il est possible que l'itinéraire entre deux points d'une région passe par un ou plusieurs chemins

extérieurs à celle-ci.

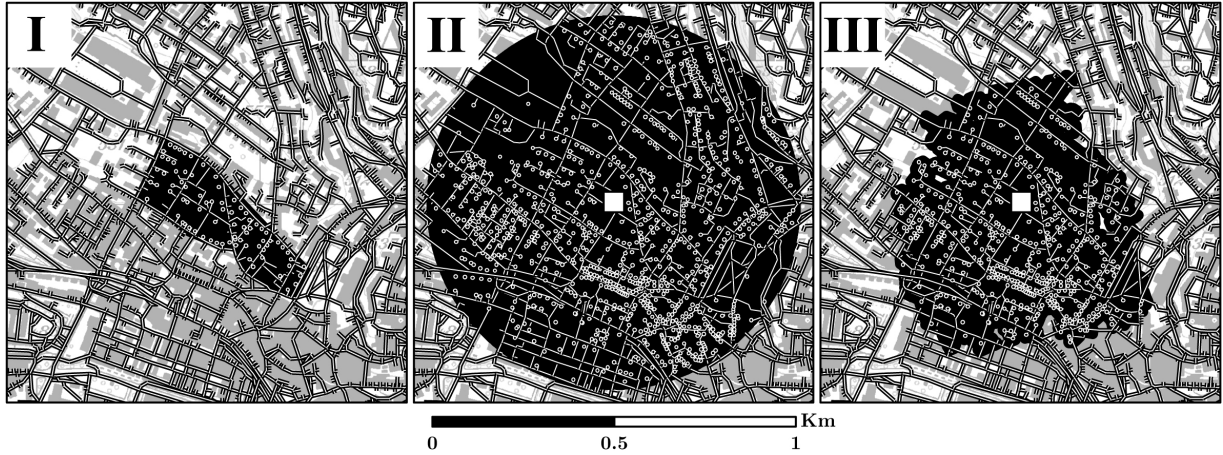


FIGURE 5 Une région A permet d'analyser un sous-ensemble de \mathcal{N}^A nœuds . Elle peut typiquement être définie d'un point de vue administratif (limite de quartiers, zone tarifaires,...) comme figuré par le quartier du Pré-du-Marché (I) où les points représentent les immeubles habités. La carte de droite (III) illustre un point de vue anthropocentrique, où la région d'un piéton est définie comme la zone $A_i^{sp}(500)$ qu'il peut couvrir depuis le nœud i (carré) en une distance de marche maximale $c = 500$ m. De manière analogue $A_i^e(500)$ représente un cercle de 500 m de rayon centré en i (II).

- Dans le cas d'analyses routières le réseau est généralement orienté ($d_{ij}^{sp} \neq d_{ji}^{sp}$) (cf. 1.4.0.2 page 25), on désignera alors par les indices *in* ou *out* le fait d'accéder ou de sortir du point adresse i (cf. formules 1.4 et 1.5 page 17) . Par contraste, les déplacements piétonniers se font sans contrainte de direction ($d_{ij}^{sp} = d_{ji}^{sp}$).
- Certaines analyses sont effectuées à différentes échelles. Les indices peuvent être calculés pour une paire de nœuds ij , un nœud i par rapport à un ensemble d'autres j nœuds (échelle locale), ou encore pour une région (échelle régionale). Ils peuvent alors géométriquement être représentés respectivement par une ligne, un point ou un polygone. Typographiquement, une simple, respectivement une double barre sur l'indice indique une échelle locale, respectivement régionale (p.ex \bar{s}_i^A , $\bar{\bar{s}}^A$) (cf. formules 1.4 à 1.7).
- Cartographiquement et sauf mention contraire, le Nord correspond toujours au haut de la figure.

Première partie

Analyse de réseau piéton et
transport optimal régularisé

Introduction

L'ensemble des recherches académiques de cette thèse sont présentées dans cette première partie. Chaque chapitre possède sa propre introduction, remettant notamment la thématique traitée dans le contexte de la littérature, et sa propre section nommée " *Perspectives et conclusion*". Les trois chapitres sont agencés selon la chronologie de leur réalisation, un développement marqué d'une complexité croissante du formalisme mathématique. Le souci d'application des méthodes développées est omniprésent, aussi de nombreuses cartes et commentaires alimentent le texte pour lui donner une dimension concrète, et on l'espère, pertinente pour l'aide à la décision spatiale et à la planification urbaine. Comme mentionné dans l'introduction générale (chap.I, p.xvii), le but des deux premiers chapitres est de mettre en place des approches et des indices pour investiguer les patterns et la morphologie du réseau piéton de Lausanne. Fait plutôt rare à notre connaissance, les indices sont pour la plupart calculés sur les données de l'ensemble d'une ville. De plus l'utilisation de distances maximales de marche permet de procéder à des analyses multi-échelle. Les deux premiers chapitres, intitulés respectivement " *Sinuosité et sinuo-centralité*" (p.5) et " *Centralité de proximité : centricité(s) et eccentricité(s)*" (p.29) constituent une unité, ensembles ils forment une approche multicritères proposant d'explorer la morphologie d'un réseau au travers de sa marchabilité, des détours qu'elle induit ou encore de la proximité qu'elle génère. Le chapitre 3 (p.49) est quant à lui d'une autre nature, l'algorithme de transport optimal régularisé présenté est sans doute la partie théorique la plus originale et novatrice de cette thèse. Conçu et développé pour répondre à la nécessité pratique de répartir les élèves dans les différentes écoles de la ville, l'algorithme peut être appliqué à toute problématique spatiale visant à attribuer, en minimisant les coûts de transport, un ensemble d'origines à un ensemble de destinations dont la capacité (d'accueil, de stockage,...) de chacune est connue. Son utilisation dans le cadre de l'organisation scolaire est illustrée et discutée dans la seconde partie de thèse (ch.5, p.84).

Chapitre 1

Sinuosité et sinuo-centralité

Le sinuosité est définie comme le rapport d_{ij}^{sp}/d_{ij}^e , toujours ≥ 1 . On le retrouve dans la littérature d'études urbaines sous le terme de "detour factor", "directness", ou encore "straightness". Les approches behavioristes de la mobilité douce font plutôt usage du terme de "detour factor". La sinuosité d'un cheminement est alors considérée comme un facteur (parmi d'autres) influençant le choix de route d'un piéton ou d'un cycliste (Koh & Wong, 2013). Dans un contexte de santé et de sécurité, Giles-Corti et al. (2011) utilisent le "detour factor" pour évaluer la marchabilité du réseau piétonnier autour d'une dizaine d'écoles. Dans un autre ordre d'idée, Witlox (2007) analyse, pour un même itinéraire, le rapport entre la distance perçue et évaluée par le sujet avec la distance du plus court chemin calculée informatiquement. Quantitativement parlant, Nordbeck (1964) et Newell (1980) ont abouti au fait qu'une marche un sein d'un réseau urbain équivaut à environ $1.2 d_{ij}^e$. Plus tardivement O'Sullivan & Morrall (1996) ont obtenu des résultats similaires en considérant les cheminements piétonniers avoisinant les stations de métro, alors que Hess (1997) relate des valeurs entre 1.2 et 1.7. Dans les années 2000, plusieurs études ont abouti au fait que la "circuitry" tend à diminuer lorsque la distance de trajet augmente. Ainsi les résultats de Witlox indiquent une valeur moyenne de 1.42 pour les parcours inférieurs à 1 km et de 1.13 pour ceux supérieurs à 15km. Les résultats de Levinson & El-Geneidy (2009) vont dans le même sens. Cela suggère que dans une optique piétonnière, impliquant des distances plutôt courtes, la sinuosité mérite d'être plus profondément explorée en considérant la morphologie du réseau sous-jacent.

Les études des patterns urbains sont nombreuses dans la littérature, les méthodes et les finalités sont multiples. On distingue toutefois globalement deux méthodes : la première se base sur les géométries du cadre bâti en considérant les surfaces construites de manière individuelle (Louf & Barthélémy, 2014) ou par "city-block" (Knight & Mar-

shall, 2014). La deuxième se fonde sur la géométrie du réseau routier et/ou piétonnier et repose dès lors sur la théorie des graphes. Les indices pouvant être calculés sont nombreux comme en témoignent les quelques 300 formules de l'article quasi encyclopédique « Spatial Networks » de Barthélémy (2011). Dans le but d'analyser et d'évaluer le réseau piétonnier de la ville, nos travaux se sont principalement orientés vers les indices de sinuosité "straightness" ou "directness centrality" et de "centralité de proximité" (closeness centrality). Ces indices se retrouvent notamment sous l'appellation MCA ("Multi Centrality Assessment") (Crucitti et al., 2006; Emmanouilidis, 2013; Mermet, 2011; Porta et al., 2006, 2008, 2009) et leur intégration dans les SIG a par exemple été proposée par Sevtsuk & Mekonnen (2012). Parallèlement à cela, Marshall propose une riche classification de patterns urbains (Marshall, 2004, 2005) établie sur la base de leurs propriétés géométriques et d'indices de connectivité. Qu'ils soient abordés dans une perspective historique ou d'avenir (Hillier et al., 1976; Porta et al., 2014), qu'ils aient ou non une influence sur les choix des modes de transport (Dill, 2004; Marshall & Garrick, 2010) et sur la sécurité (Marshall & Garrick, 2011), les patterns urbains représentent un domaine riche et variés des études urbaines.

Eu égard de ce contexte, ce chapitre propose d'étudier au travers de la sinuosité les multiples patterns constituant le réseau piétonnier. La méthode exposée dans la section 1.1 a pour but d'évaluer la connectivité entre les bâtiments d'une même ou de deux régions (quartier), ainsi que pour détecter de potentiels emplacements de raccourcis. La section 1.2 évalue quant à elle la connectivité d'un bâtiment au réseau piétonnier avoisinant au travers de la construction de "pedsheds". La section 1.3 définit un indice de sinuosité ("straightness centrality") et discute les résultats obtenus à différentes échelles. Quelques perspectives associées d'une conclusion closent le chapitre (1.4).

1.1 Évaluation de l'interconnectivité des bâtiments

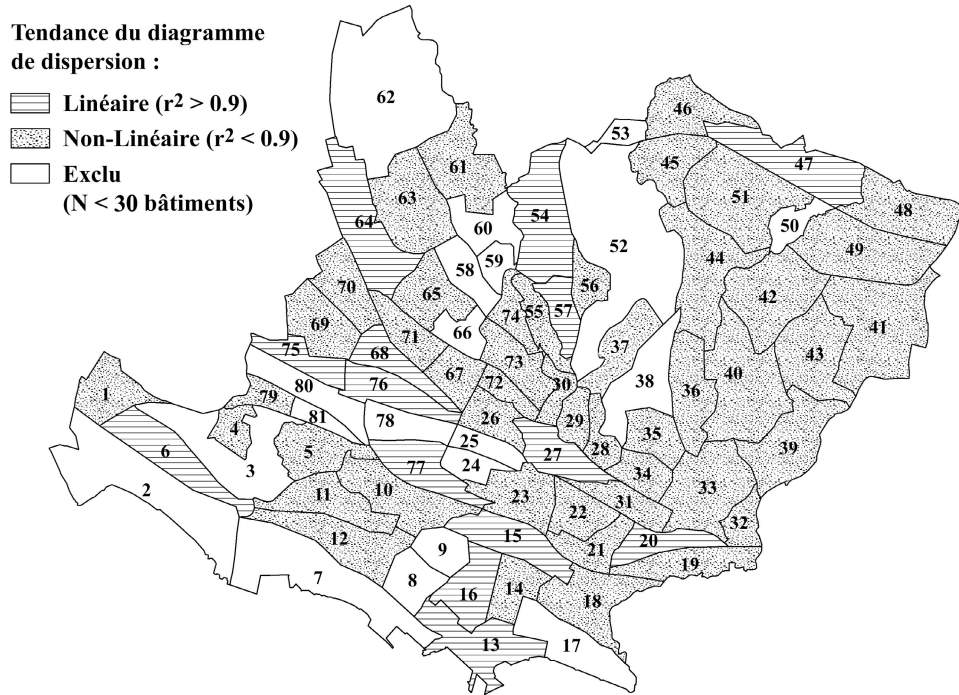
Afin d'évaluer la connectivité d'un réseau piéton d'une région A choisie, l'idée est de comparer d_{ij}^{sp} et d_{ij}^e sur les paires de nœuds $i, j \in A$. La connectivité est optimale en termes de distance lorsque $d_{ij}^{sp} = d_{ij}^e$. S'il s'agit de comparer la connectivité entre deux régions A et A' alors $i \in A$ et $j \in A'$. L'approche est visuelle : elle consiste à produire et à analyser le diagramme de dispersion de d_{ij}^{sp} en fonction de d_{ij}^e . Si le nuage de points obtenus présente une allure de droite, cela dénote d'une bonne connectivité $d_{ij}^{sp} \approx d_{ij}^e$, et inversement si le pattern présente un phénomène de diffusion marqué (hétéroscédasticité). Pour que l'approche soit pertinente et efficiente en termes computationnels, il est préférable de considérer un nombre N^A restreint de nœuds.

Par ailleurs et dans un contexte piétonnier, cela ne fait pas particulièrement sens de s'interroger sur la connectivité de deux bâtiments situés de part et d'autre de la ville. Les analyses ici exposées portent ainsi sur les 7'781 bâtiments habités répartis au sein des 81 quartiers officiels. La morphologie du réseau piéton étant très diversifiée, le panel de diagrammes de dispersion obtenu l'est tout autant. Pour chacun d'entre eux une régression linéaire de d_{ij}^{sp} en fonction de d_{ij}^e a été calculée. Les patterns ayant un $r^2 \geq 0.9$ ont été considérés comme "linéaires" et les autres comme "non-linéaires", cela représente respectivement 13 et 46 cas. Les 22 quartiers ayant moins de 60 bâtiments ne présentent pas de résultats intéressants et ont donc été exclus de cette approche. Il s'agit principalement des quartiers de détente et de loisirs (parcs publics) ou de zones affectées aux transports ferroviaire (rails, hangar) ou aérien (piste d'aéroport). La carte figure 1.1 permet de se faire une idée globale des résultats obtenus. Les cas ayant une bonne connectivité ont tendance à se regrouper dans le Sud entre Grancy (15) et Ouchy (13), dans le Centre-Ouest (Prélaz, Av. d'Echallens, Av. de Morges) ou encore dans le Centre-Nord avec le couple Bellevaux (54) / Rouvraie (57). La connectivité du réseau au sein des cas ayant une tendance non-linéaire mérite d'être investiguée. Bien que ces cas se retrouvent dans toutes les parties de la ville, l'Est et le Sud-Ouest sont particulièrement concernés.

1.1.1 Diagrammes de dispersion à tendance linéaire

Pour faciliter la lecture des graphiques, les droites de référence $d_{ij}^{sp} = d_{ij}^e$, $d_{ij}^{sp} = 2d_{ij}^e$ ainsi que la droite de régression et son équation sont indiquées.

Sur les 81 quartiers, celui de la Rue centrale (fig.1.2, gauche) présente le moins de dispersion : la longueur d'un trajet à pied dans ce quartier peut être estimée comme $1.17 d^e + 46.2$ m. Au niveau de l'interprétation, les points situés à proximité de la droite $d_{ij}^{sp} = d_{ij}^e$ indiquent les paires de bâtiments reliés en ligne droite (situation optimale). Inversement, plus ils en sont éloignés plus le trajet implique un détour important. On remarque qu'à environ $d_{ij}^e \approx 150$ m le nuage de point s'en écarte : cette distance représente l'itinéraire possible le plus long en ligne droite au sein du quartier. On observe que l'écartement (I) a tendance à croître lorsque d_{ij}^e augmente. Sa valeur représente le détour minimal entre toutes les paires de bâtiments pour un d_{ij}^e donné, et varie selon la zone d'étude.



ID	Nom	S (km ²)	N	ID	Nom	S (km ²)	N	ID	Nom	S (km ²)	N
1	Bourdonnette	0.18	57	29	Cité	0.09	59	56	Rte du Signal	0.10	53
2	Bourget	0.57	3	30	Riponne-Tunnel	0.07	47	57	Rouvraie	0.12	48
3	Vallée de la Jeunesse	0.40	9	31	Avant-Poste	0.13	89	58	Stade	0.13	1
4	Pyramides	0.08	57	32	Ch. de la Vuachère	0.09	39	59	Ancien-Stand	0.07	26
5	Montoie	0.20	174	33	Av. Secrétan	0.35	247	60	Bois-Mermet	0.16	13
6	Prés-de-Vidy	0.26	54	34	Mon-Repas	0.12	10	61	Bois-Gentil	0.29	191
7	Bellerive	0.51	3	35	Béthusy	0.14	114	62	Blécherette	0.82	1
8	Les Cèdres	0.14	10	36	Victor-Ruffy	0.23	166	63	Bossons	0.33	86
9	Milan	0.12	1	37	Le Vallon	0.18	60	64	Pierrefleur	0.37	136
10	Marc-Dufour	0.28	276	38	Hôpitaux	0.26	17	65	Bergières	0.20	105
11	Mont-d'Or	0.22	166	39	Plaisance	0.30	230	66	Beaulieu	0.10	9
12	Cour	0.28	150	40	Chailly	0.44	265	67	Maupas	0.12	125
13	Ouchy	0.28	104	41	Bois de Rovéréaz	0.49	21	68	Av. d'Echallens	0.15	170
14	Av. d'Ouchy	0.14	76	42	Devin	0.36	257	69	Valency	0.21	92
16	Harpe	0.19	193	43	Craivavars	0.30	242	70	Chablère	0.19	158
17	Elysée	0.25	21	44	La Sallaz	0.36	220	71	Montétan	0.14	146
18	Montchoisi	0.27	165	45	Vennes	0.20	53	72	Pré-du-Marché	0.08	78
19	Chissiez	0.19	97	46	Grand-Vennes	0.22	80	73	Valentin	0.18	137
20	Av. Rambert	0.13	76	47	Ch. des Roches	0.33	98	74	Pontaise	0.10	142
21	Florimont	0.14	97	48	Praz-Séchaud	0.29	75	75	Prélaz	0.13	89
22	Georgette	0.15	80	49	Grangette	0.40	99	76	Rue de Morges	0.18	169
23	Gare/Petit-chêne	0.21	102	50	Valmont	0.09	15	77	Tivoli	0.20	85
24	Montbenon	0.08	9	51	Route de Berne	0.43	162	78	Rue de Sébeillon	0.15	10
25	Flon	0.09	12	52	Sawabelin	0.93	9	79	Malley	0.08	44
26	Chauderon	0.13	126	53	Pré-Fleuri	0.06	20	80	Gare de Sébeillon	0.20	2
27	Rue Centrale	0.18	226	54	Bellevaux	0.36	257	81	Av. de Provence	0.06	1
28	Marterey	0.09	77	55	Borde	0.12	100	Total		18	7'589

FIGURE 1.1 Carte des quartiers statistiques lausannois de surface S , contenant N bâtiment(s) et tendance des diagrammes de dispersion.

Un détour est engendré par la géométrie même des arêtes du réseau et de leur interconnectivité. L'angle et la longueur des chemins reliant les bâtiments à la route jouent également un rôle. Le maillage du réseau de la « Rue Centrale » est dense et sa géométrie est constituée de polygones irréguliers caréiformes. Pour le bonheur des amateurs de lèche-vitrine, la grande majorité des nombreuses surfaces commerciales ont pignon sur rue. Le quartier de Bellevaux (1.2, droite) est traversé de part et d'autre par trois longues routes presque droites qui engendrent un écart à la droite $d_{ij}^{sp} = d_{ij}^e$ plus constant et de valeur plus faible. En imaginant un trajet allant du bas au haut du quartier (d_{ij}^e grand) on se rend vite compte que le quartier de Bellevaux est plus à même d'offrir un itinéraire quasi-rectiligne. Le graphique de Bellevaux présente malgré tout une dispersion plus importante où de nombreux points se situent au-dessus de la droite $d_{ij}^{sp} = 2 d_{ij}^e$ lorsque $d_{ij}^e \leq 200\text{m}$. Cela s'explique principalement par le fait que dans sa partie haute, le réseau est composé de géométries plus étirées (cf. fig.1.4), et qu'il contient quelques chemins sans issue ("culs de sacs"). L'analyse d'autres cas permet de mieux saisir les propriétés géométriques amenant à des cheminements sinueux en milieu urbain.

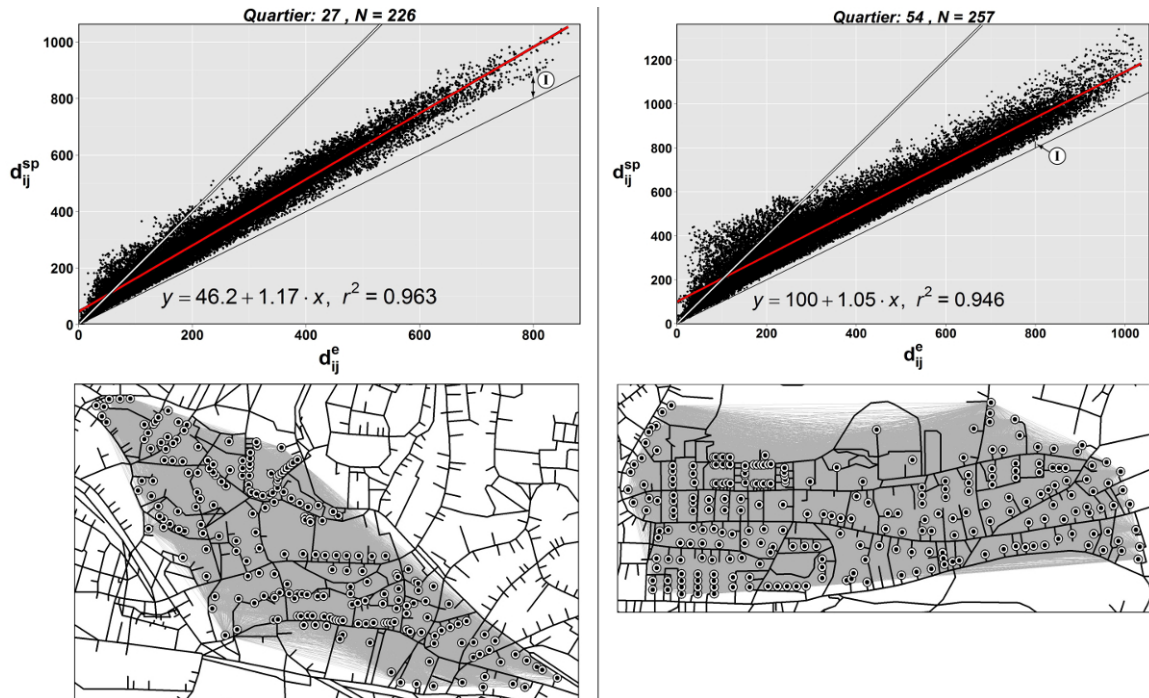


FIGURE 1.2 La faible dispersion du nuage de points témoigne d'une bonne connectivité du réseau piéton dans les quartiers de la Rue Centrale (gauche) et de Bellevaux (droite).

1.1.2 Diagrammes de dispersion à tendance non-linéaire

Sis sur le lit d'une rivière recouverte, le quartier de la Borde est fait d'une suite de constructions contiguës et continues établies le long de plusieurs rues parallèles (Figure 1.3, haut). La densité de construction et les pentes du quartier ne laissent que peu d'opportunité pour créer des jonctions entre ces rues. Il en résulte un pattern de rues fait de géométries allongées où des bâtiments sont proches à vol d'oiseau mais plus distants à pied (I). Cela se traduit par l'apparition d'une bosse sur le diagramme de dispersion. En toute logique, plus le pattern décrit des formes allongées et fines plus ce phénomène de bosse s'accroît. Le point II indique deux groupes de bâtiments séparés par plusieurs rues "parallèles" et nécessitant d'importants détours pour être relié l'un à l'autre. La figure du milieu illustre le cas d'un quartier à forte densité situé aux frontières de la ville (Grand-Vennes). Bien que la géométrie du réseau soit irrégulière, on peut remarquer que la partie basse (III) est constituée de polygones de tailles variables, alors que le haut (IV) présente une succession de longs chemins sans issue. Le graphique indique de nombreuses paires de bâtiments pour lesquels $d_{ij}^{sp} = 4 d_{ij}^e$, cette configuration de rue est donc loin d'être optimale. Le dernier cas exposé est celui du quartier des Bossons. Il est constitué à l'Est de deux longues barres de bâtiments, alors qu'à l'Ouest (V) se trouvent deux hameaux résidentiels totalement isolés l'un de l'autre est raccordé uniquement à la route principale. Ce manque de connectivité se traduit par l'apparition "d'épis", également visible dans le cas précédent ainsi qu'à Bellevaux (fig.1.2, droite).

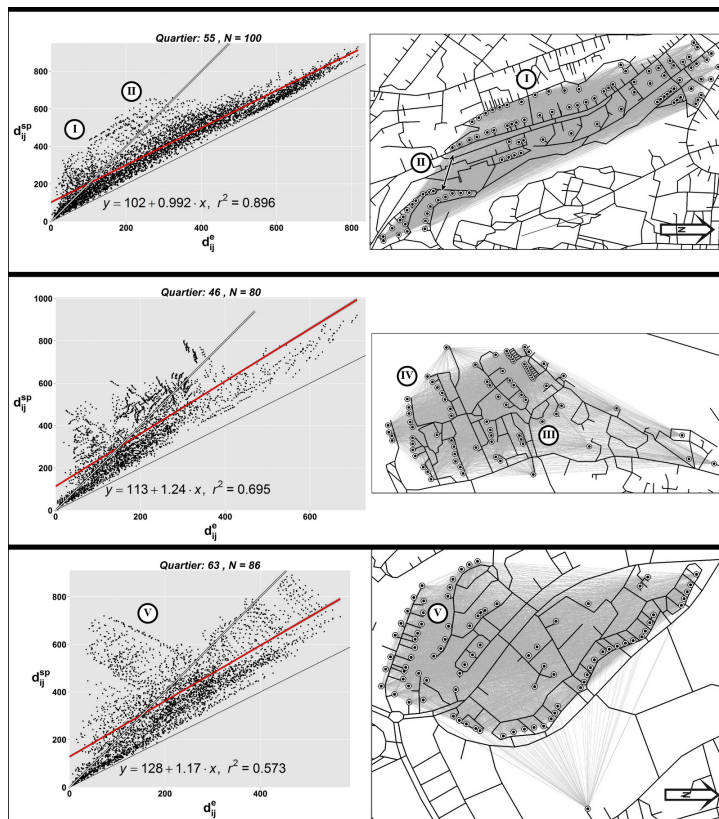


FIGURE 1.3 Exemple de diagrammes de dispersion à tendance non-linéaire avec $N \leq 100$ correspondant à des morphologies de réseau différentes. De haut en bas : Borde, Grand-Vennes, Bossons.

En synthèse, il apparaît qu'un pattern de rue polygonal implique un détour plus long lorsque ses géométries sont étirées (cf. fig. 1.4). Le diagramme de dispersion associé présente alors une forme de bosse. Les cul-de-sacs sont un facteur de détour important, leur présence se manifeste sous formes d'épis sur les graphiques et donnent un aspect hérissé au nuage de points.

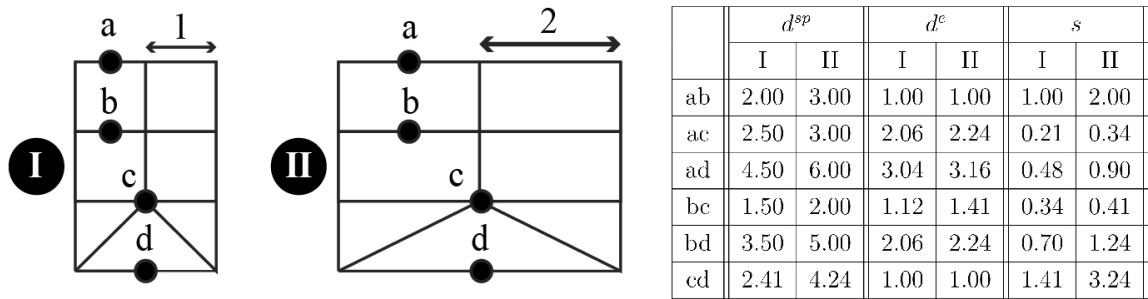


FIGURE 1.4 Sinuosité et anisotropie. Le pattern I illustre une structure carrée dans sa partie supérieure, et triangulaire dans sa partie inférieure. L'étirer horizontalement d'un facteur 2 génère le cas II. Le tableau indique les distances et la sinuosité entre les quatre points (a à d) obtenues pour I (à gauche) et II (à droite). Le passage d'une grille carrée (I) à un maillage rectangulaire (II) engendre une augmentation de la sinuosité pour l'ensemble des paires de points considérées. Le cas $a \leftrightarrow b$ est particulièrement affecté et représente le cas classique d'un "city-block" (Siksna, 1997) ou de deux rues parallèles. Plus le rectangle est allongé, plus la valeur de s_{ab} est élevée. À noter qu'une dilatation isotrope du pattern n'influence pas la sinuosité.

L'analyse de quartiers comprenant plus de bâtiments induit une densité de points plus importante sur les graphiques (fig. 1.5). Les résultats peuvent toutefois être analysés selon les mêmes principes. Construit ces dernières années, l'îlot de Maillefer (I) est enclavé dans le quartier de Bois-Gentil et ne peut y accéder que par un seul chemin à l'Est. Cet isolement est à la source de l'importante dispersion en épis. Cette situation sera prochainement améliorée, des passerelles piétonnes reliant l'îlot au Sud et à l'Est (Entre-Bois) étant en cours de réalisation (projet « Métamorphose »). Le quartier de Montelly (au centre) est traversé par une route principale en forme de « U » à laquelle se rattachent plusieurs groupes de bâtiments, formant des grappes isolées au centre du quartier (II). On remarque que d_{ij}^{sp} varie très fortement lorsque $d_{ij}^e \leq 200\text{m}$ et que pour bon nombre de cas $d_{ij}^{sp} > 2d_{ij}^e$ lorsque $d_{ij}^e \leq 400\text{m}$. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le quartier « villas » de Craiavers (Chailly-Nord) où une multitude de chemins sans issue raccordent les habitations à des routes sinueuses (III).

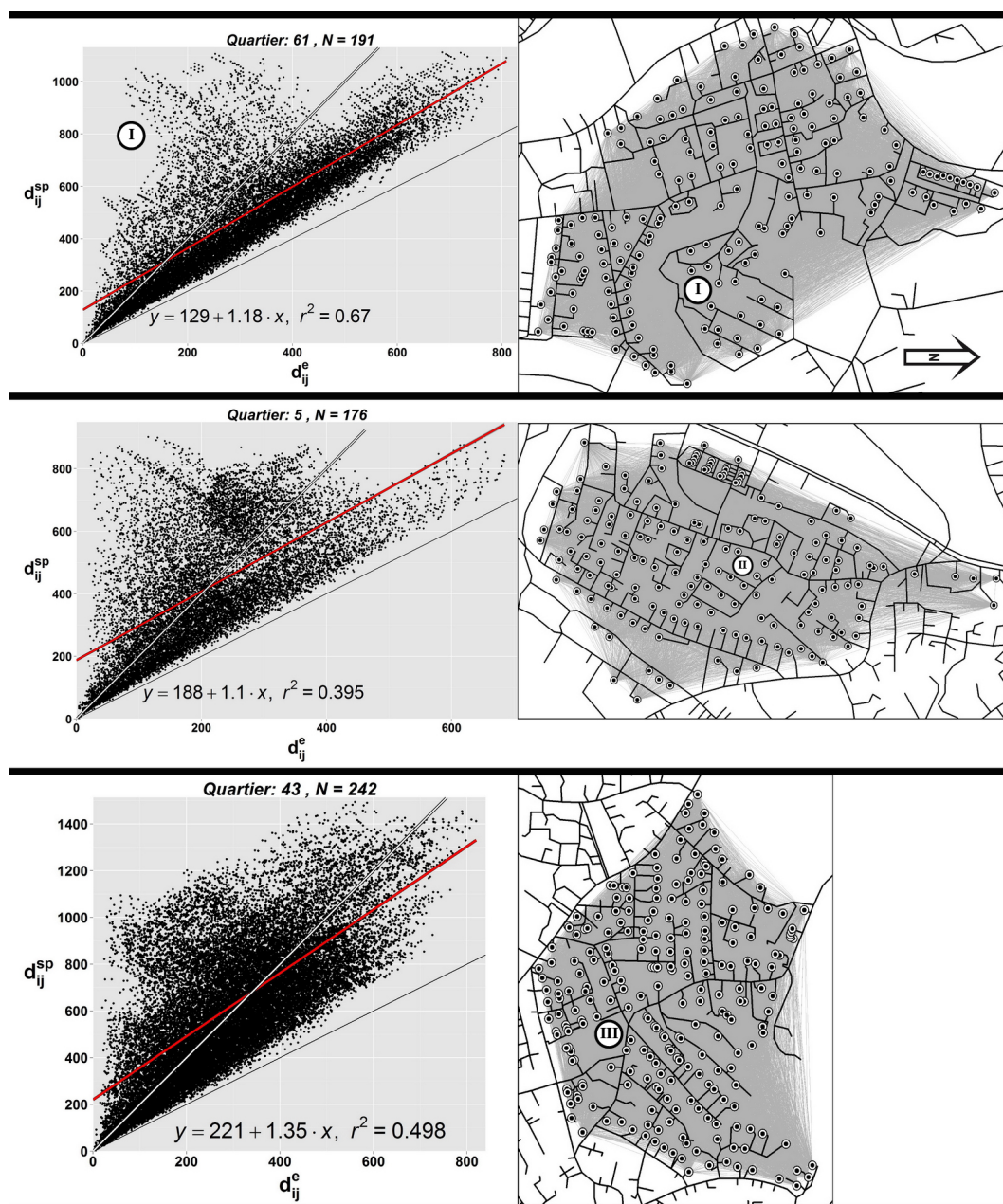


FIGURE 1.5 Exemple de diagrammes de dispersion à tendance non-linéaire avec $N > 100$. De haut en bas : Bois-Gentil, Montelly, Craiavers.

1.1.3 Évaluation de la connectivité entre deux quartiers

De manière analogue, la méthode peut être utilisée pour évaluer la connectivité entre deux quartiers proches ou contigus A et A' . Le diagramme de dispersion est obtenu en calculant d_{ij}^{sp} et d_{ij}^e tel que $i \in A$ et $j \in A'$. Dans la figure 1.6 (haut), les deux quartiers sont séparés par des voies ferrées qui limitent le nombre de connexions et engendrent ainsi une mauvaise connectivité entre eux. À l'inverse la figure du bas relate le cas de deux quartiers pour lesquels le cadre construit est continu et mieux connecté comme en témoigne la faible dispersion du nuage de points.

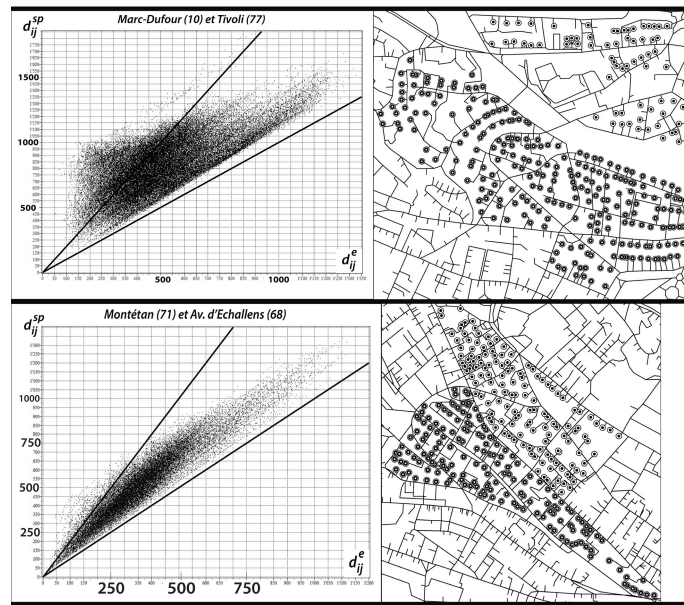


FIGURE 1.6 Évaluation de la connectivité entre deux quartiers par diagramme de dispersion.

1.1.4 Détection et simulation de raccourci(s)

La sinuosité peut être utilisée pour détecter de possible(s) emplacement(s) de raccourci au sein d'un quartier. L'idée est d'identifier puis de cartographier les paires de nœuds ayant une valeur forte de d_{ij}^{sp} pour une valeur de d_{ij}^e faible. Dans l'exemple ci-dessous (fig. 1.7a), les cas sont identifiés et sélectionnés (S1 et S2) directement à partir du diagramme de dispersion. Leur représentation spatiale (ligne) permet d'identifier clairement les zones marquées par un manque de connectivité, suggérant ainsi la localisation de potentiel(s) raccourci(s). Une simulation a été effectuée en ajoutant deux raccourcis au réseau comme indiqué sur la figure 1.7 (b) (gauche). La comparaison entre les graphiques sans (centre) et avec (droite) raccourcis montre un "effondrement" net de la dispersion signifiant une amélioration globale de la connectivité du

réseau piétonnier.

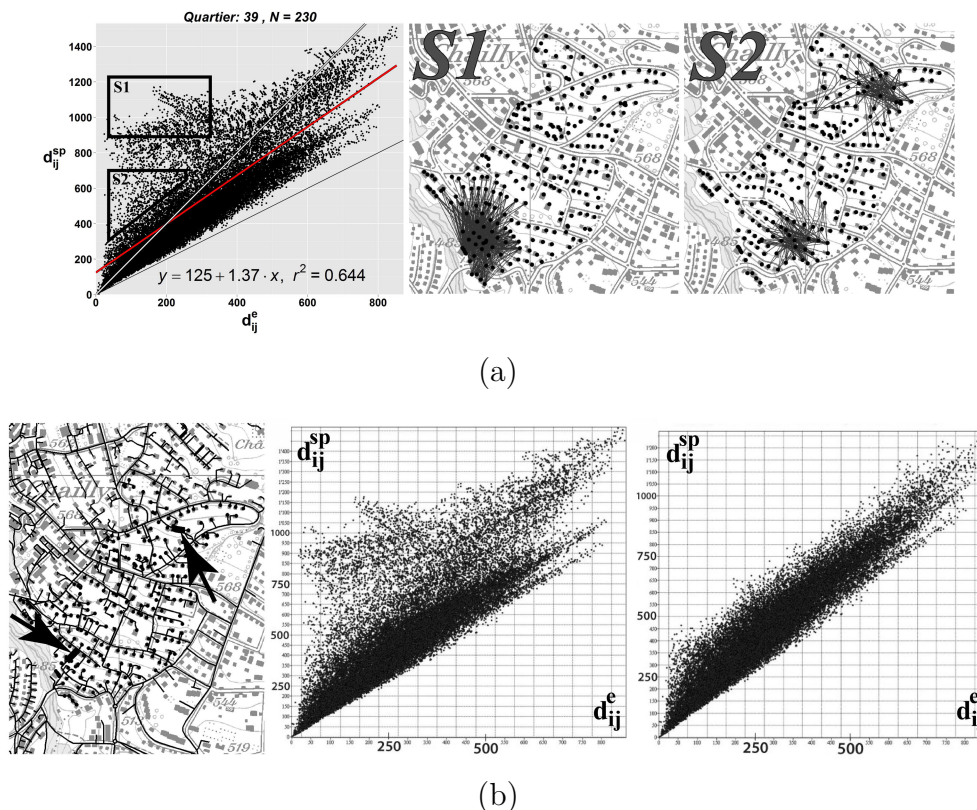


FIGURE 1.7 Détection (a) et simulation (b) de raccourcis dans le quartier de Plaisance.

L'approche proposée est essentiellement visuelle, des méthodes algorithmiques ont été présentées par exemple par Meyerson & Tagiku (2009) ou encore Demaine & Zadimoghaddam (2010). Dans une perspective plus concrète, on notera que la mise en place de nouveau(x) raccourci(s) en milieu urbain peut très rapidement se heurter à de nombreuses contraintes qui, bien souvent, outrepassent le paradigme de l'optimisation mathématique.

1.2 Connectivité d'un bâtiment au réseau piétonnier avoisinant

Jusqu'à présent la méthode et les résultats exposés ont porté sur l'analyse entre paires de points. Elle peut également être appliquée pour visualiser et évaluer la connectivité d'un bâtiment par rapport à un ensemble d'autres bâtiments (fig. 1.9). Dans une problématique scolaire, cela revient par exemple à analyser la position d'une

école relativement aux bâtiments situés à une certaine distance. Comme nous le verrons ultérieurement, la proximité domicile-école est une composante importante dans l'organisation scolaire lausannoise. Cela est particulièrement vrai pour les plus jeunes ayant une distance domicile-école moyenne d'environ 500 m. L'analyse du réseau piétonnier environnant les écoles et d'autant plus pertinente que les courts trajets sont souvent affectés par de nombreux détours. Pour accomplir cette tâche, l'approche par diagramme de dispersion est complétée par une approche par "pedsheds" (Leslie et al., 2007). Un pedshed k_i évalue la marchabilité jusqu'à c mètres autour d'un point i , il est défini par le rapport entre deux surfaces S :

$$k_i(c) = \frac{S(A_i^{sp})}{S(A_i^e)} \text{ avec } 0 \leq k_i \leq 1 \quad (1.1)$$

Pour un c fixé, la marchabilité moyenne autour d'un ensemble de N points est calculée comme :

$$\bar{k}(c) := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i(c) \quad (1.2)$$

La figure 1.8 permet de mieux saisir les tenants et aboutissants du calcul d'un pedshed. Le cercle gris de surface $S(A_i^e)$ est centré sur le collège de Pierrefleur et a un rayon de 500m. La zone noire, nommée zone de service, zone de desserte ou encore zone d'attente, correspond à la surface $S(A_i^{sp})$ pouvant être couverte par une marche d'au maximum 500 m. Dans la littérature Giles-Corti et al. (2011) préconisent qu'une valeur ≥ 0.6 indique une bonne marchabilité autour d'un centre d'intérêt. Cette valeur est toutefois très ambiguë. En effet, $S(A_i^{sp})$ est générée au travers d'une extrapolation des géométries du réseau. Selon les paramètres choisis, cette opération de morphologie mathématique produit des résultats forts différents pour un même cas d'étude. Cela est visible et détaillé dans la figure 1.8 où pour une même situation mais pour un paramétrage différent les valeurs obtenues oscillent entre 0.49 et 0.27. Ces résultats n'invalident pas pour autant cette approche, mais suggèrent que la valeur de $k_i(c)$ peut difficilement être utilisée pour comparer différentes études. L'approche par diagramme de dispersion est à ce titre plus précise puisque l'algorithme de Dijkstra ne procède à aucune extrapolation et ne nécessite aucun paramètre extérieur.

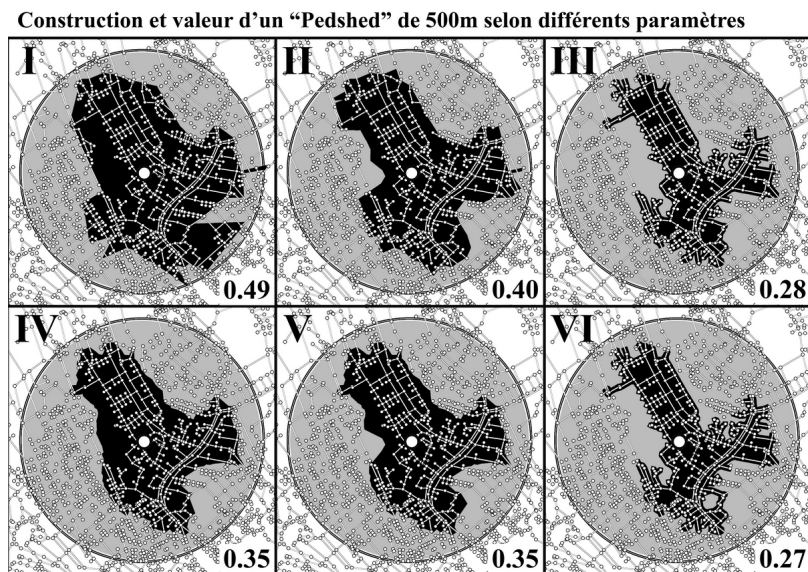


FIGURE 1.8 Illustration de la construction d'un pedshed autour du collège de Pierrefleur selon différents paramètres dans ArcGIS. Le premier consiste à définir le rayon de la zone à étudier (ici $c = 500$ m). Le deuxième concerne le niveau de détail du polygone $S(A_i^{sp})$ (en noir) : sur la ligne du haut le niveau de simplification est important (polygone « généralisé »), alors que ceux de la ligne du bas sont générés avec des contours plus détaillés. Le troisième paramètre est un buffer de distance fixe qui est généré à partir et autour du réseau. Les 3 colonnes indiquent un buffer respectif (de gauche à droite) de 100, 50 et 10 m. Les résultats montrent que la taille des surfaces obtenues est variable. La disparité est plus grande pour les polygones généralisés où $k_i(500)$ varie de 0.49 (I) à 0.28 (III). On notera toutefois qu'on peut s'attendre à ce que ces paramètres amènent à des résultats plus homogènes dans le cas d'un réseau plus régulier et symétrique (typiquement en forme de grille). Pour la suite des analyses, on considérera la configuration VI (dans ArcGIS, *GenerateServiceAreas : DETAILED_POLYS*, polygone détaillé et *Polygon_Trim_Distance = 10* m).

Les approches par diagramme de dispersion et par pedshed peuvent être combinées (fig. 1.9). À gauche, le graphique du collège de Pierrefleur par rapport à l'ensemble des bâtiments de la ville est marqué d'un léger phénomène d'hétéroscédasticité. On remarque dans l'intervalle $250 \leq d_{ij}^e \leq 500$ m (milieu) un certain nombre de points se trouvant au-dessus de la droite $d_{ij}^{sp} = 2 d_{ij}^e$. Leur cartographie (à droite) permet de pointer les bâtiments situés dans un périmètre de 500 m et pour lesquels le trajet à pied vers l'école est au moins deux fois plus long qu'en ligne droite. Leur regroupement et leur orientation se font dans deux directions distinctes, suggérant ainsi un manque de connectivité entre l'école et les immeubles situés à l'Ouest et au Nord-Est. Le tracé irrégulier de la zone d'attente $A_i^{sp}(500)$ (en noir) dans ces mêmes directions, et la valeur $k_i(500) = 0.35$ confirme ce manque. En dehors de sa représentation visuelle, l'approche par pedshed est intéressante également par le fait qu'elle constitue une

valeur ponctuelle. Cette propriété nous apparaît comme avoir été sous-exploitée dans la littérature, où les études portent généralement sur un nombre restreint de sites. C’est ainsi que dans la suite des analyses les pedsheds ont été calculés autour des 7’181 bâtiments de la ville afin d’évaluer la marchabilité en ville de Lausanne. Les résultats sont comparés à ceux obtenus au travers de l’indice de sinuosité défini dans la section suivante.

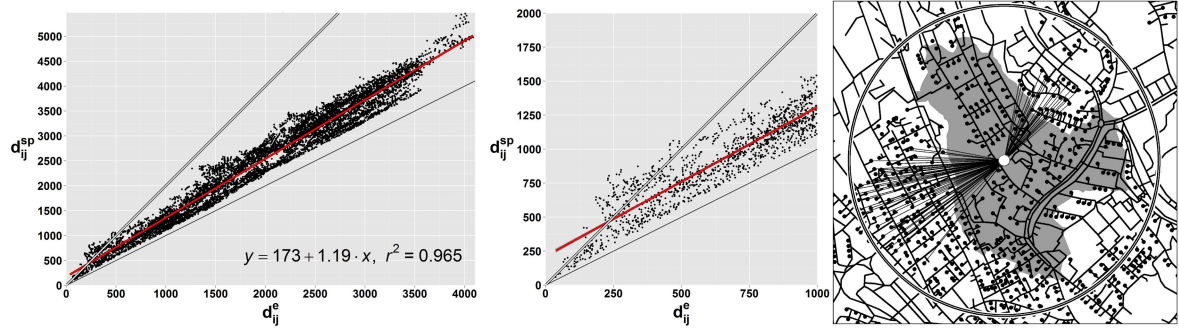


FIGURE 1.9 Évaluation par diagramme de dispersion et par pedshed de la connectivité du réseau piéton dans un rayon de 500m autour du collège de Pierrefleur. Ces deux méthodes ne mesurent pas la même chose. En effet, la première permet d’évaluer la connectivité entre une ou des origines vers une ou plusieurs destinations connues, alors qu’un pedshed considère l’ensemble des noeuds et des arêtes accessibles dans un certain rayon depuis une seule origine. Les destinations aussi bien que l’origine ne représentent donc pas forcément des bâtiments.

1.3 Indice de sinuosité et sinuo-centralité

L’indice de sinuosité proposé diffère d’un facteur -1 par rapport à l’indice d_{ij}^{sp}/d_{ij}^e communément trouvé dans la littérature. Il mesure le détour relatif d’un trajet entre une origine i et une destination j . Bien que les analyses portent principalement sur des distances symétriques, le formalisme associé à un réseau orienté est ici présenté. Il est défini comme :

$$s_{ij} := \frac{d_{ij}^{sp} - d_{ij}^e}{d_{ij}^e} \quad \text{Par construction, } s_{ij} \geq 0. \quad (1.3)$$

À échelle ponctuelle la sinuo-centralité moyenne pour un point i est donnée par la moyenne pondérée à tous les autres. Il s’agit d’une variante pondérée de la “Straightness centrality” (Vragović et al. 2005, Erath et al. 2009) :

$$\bar{s}_i^{A \text{ out}} := \sum_{j \in A} f_j^A s_{ij} \quad (1.4) \quad \bar{s}_i^{A \text{ in}} := \sum_{j \in A} f_j^A s_{ji} \quad (1.5)$$

$$\delta(\bar{s}_i^A) := \bar{s}_i^{A \text{ in}} - \bar{s}_i^{A \text{ out}} \quad (1.6)$$

Avec f_j le poids relatif du nœud j (éq.1 p.xxv). \bar{s}_i^A constitue un indice de centralité dans le sens où être central c'est être relié aux autres en ligne droite. Si $\delta(\bar{s}_i^A) > 0$ cela signifie que le détour nécessaire pour accéder à un point i est en moyenne plus important que pour en sortir. Et inversement si $\delta(\bar{s}_i^A) < 0$. Dans le cas d'un réseau non-orienté on a bien évidemment $\bar{s}_i^{A \text{ in}} = \bar{s}_i^{A \text{ out}}$. À noter qu'afin de rendre l'indice moins sensible aux valeurs extrêmes, l'utilisation de la médiane pondérée au lieu de la moyenne pondérée comme en 1.4 est aussi possible.

Enfin, on détermine la sinuosité moyenne d'une région A par :

$$\bar{\bar{s}}^A := \sum_{i,j \in A} f_i^A f_j^A s_{ij} \quad (1.7)$$

1.3.1 Analyses et résultats

La cartographie de $\bar{\bar{s}}^A$ (fig. 1.10) corrobore les résultats de l'approche par diagramme de dispersion (fig. 1.1 page 8) et permet de quantifier le phénomène. En l'occurrence, sur les 66 quartiers analysés, 55 ont une sinuosité moyenne inférieure à 1 : on peut donc s'attendre à ce qu'un trajet reliant deux bâtiments soit en moyenne jusqu'à deux fois plus long à pied qu'à vol d'oiseau. Exception faite de Beaulieu (0.24), $\bar{\bar{s}}^A > 0.4$ pour l'ensemble des quartiers. À l'Est le Bois de Rovéréaz et le Ch. de la Vuachère, à l'Ouest Montoie et Malley représentent les valeurs les plus fortes ($\bar{\bar{s}}^A > 1.2$).

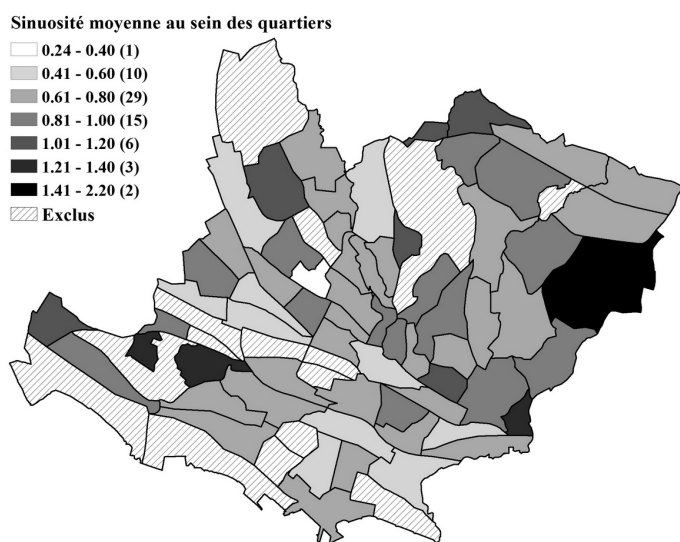


FIGURE 1.10 Sinuosité moyenne $\bar{\bar{s}}^A$ à l'intérieur des quartiers

À échelle ponctuelle et en considérant l'ensemble des 7'781 bâtiments habités, la cartographie de \bar{s}_i^A (8 classes d'environ 973 individus chacune) apporte un niveau de détail plus important et permet d'identifier des maxima et minima locaux (Figure 1.11). À noter que le pattern obtenu en pondérant les analyses par la population est similaire à la version uniforme présentée ici. Globalement le Sud-Ouest, de Ouchy (6) à la Riponne (11) et Mon-Repos (14) peut rallier en moyenne les points de la ville le plus en ligne en droite. Cela s'explique principalement par le fait que ces lieux

ont tous accès à des routes ouvrant les portes de toutes les directions de la ville. Ce phénomène se retrouve également dans les quartiers périphériques de la Bourdonnette (1) et de Praz-Séchaud (22). Les voies de chemins de fer ont pour effet d'isoler les quartiers du Sud-Ouest allant de Montoie (4) à la Place de Milan (5) qui obtiennent ainsi des valeurs plus élevées. À l'Est la morphologie sinueuse des routes et la faible interconnectivité des résidences de Chailly (20) engendrent de fortes valeurs de l'indice, et ce particulièrement pour le quartier du Bois-de-Rovéraz (à l'extrême droite de la carte). À cela s'ajoute les abruptes pentes creusées par la rivière du Flon entre la Sallaz (19) et la Place de l'Ours (13) qui constituent une barrière géomorphologique entre l'Est et l'Ouest. Cette même rivière est également source d'enclavement des quartiers de Boissonet et de Grand-Vennes (21). Les itinéraires au travers du Bois-de-Sauvabelin (18) sont possibles, sinueux, peu nombreux et plutôt axés dans axe Nord-Sud. À sa gauche, sertis entre deux bois, s'écoulent les quartiers d'Entre-Bois et de Bellevaux. Plus au Sud, en direction de la Riponne (11), une forte rupture de pente entre la Borde et la Rouvraie constitue un obstacle de plus aux cheminements Est-Ouest comme le suggère les valeurs élevées de cette partie de la ville. En dehors de ces éléments la connectivité du Nord-Ouest vers le Sud est également contrainte par les rails. On y dénote deux concentrations de valeurs fortes déjà exposées (Maillefer : fig. 1.5 (haut), Bossons fig. 1.3 (bas)).

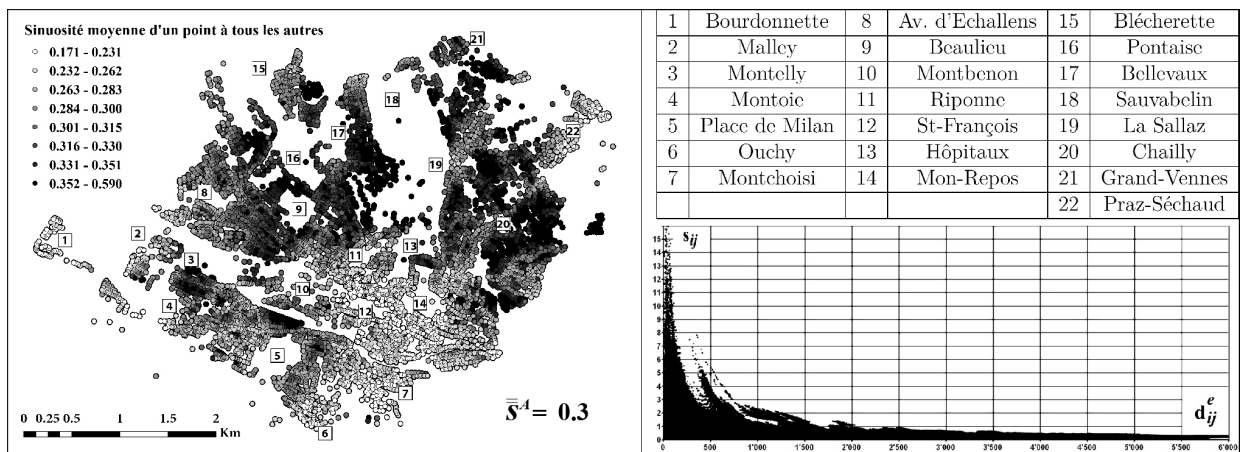
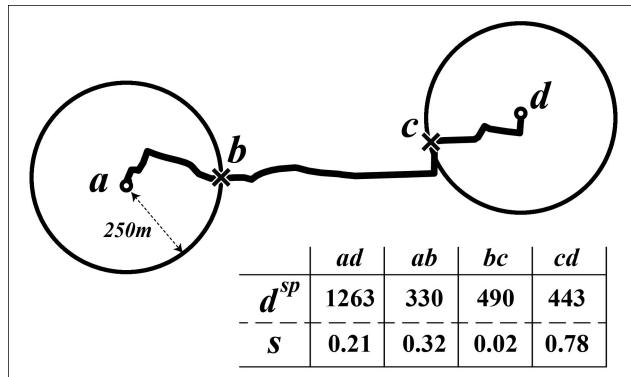


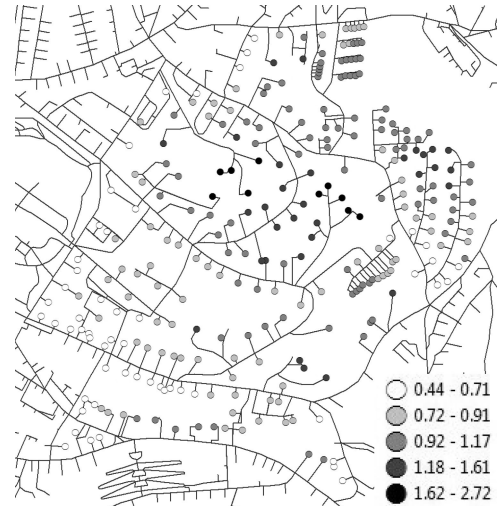
FIGURE 1.11 Cartographie de \bar{s}_i pour l'ensemble des bâtiments habités et diagramme de dispersion de s_{ij} en fonction de d_{ij}^e .

On remarque que les scores obtenus, oscillant entre 0.17 et 0.59, sont bien moins élevés que ceux obtenus au sein des quartiers (fig. 1.10). Cela est dû au fait que sont ici utilisées l'ensemble des paires de points (soit environ 60 millions) mettant en jeu des distances plus grandes de faible sinuosité. Le diagramme de dispersion

illustre cette décroissance continue de s_{ij} en fonction de d_{ij}^e . Les décollements visibles sur le graphique relatent principalement la mauvaise connectivité Est-Ouest entre les différents quartiers du Nord de la ville. La sinuosité est particulièrement élevée pour les itinéraires que l'on peut qualifier « d'intra-quartier ». Les itinéraires plus longs peuvent être globalement décomposés en 3 étapes (Fig. 1.12 (a)). En premier lieu, il s'agit de quitter le quartier d'origine ($a \rightarrow b$) pour rejoindre une route « principale ». Principale dans le sens où elle ouvre une voie d'accès « inter-quartier » menant à proximité de la destination ($b \rightarrow c$). Dans un 3ème temps, on retombe dans une échelle « intra-quartier » pour rejoindre la destination ($c \rightarrow d$). Plus la distance interquartier est longue et rectiligne moins les détours intraquartiers autour de l'origine et de la destination ont de poids dans le calcul de s_{ad} . L'augmentation de d_{ad}^e constitue un changement d'échelle où les sinuosités intraquartier n'ont qu'une influence de plus en plus faible sur la valeur de la sinuosité de l'ensemble du trajet.



(a) Décomposition d'un itinéraire en trois étapes et sinuosité associée aux tronçons intra- ($a \rightarrow b, c \rightarrow d$) et inter-quartier ($b \rightarrow c$).



(b) Les valeurs fortes de \bar{s}_i^A permettent de pointer les bâtiments situés dans des culs-de-sac ou le long de routes sinueuses.

FIGURE 1.12

Dans une optique piétonnière, les itinéraires allant d'un bout à l'autre de la ville sont de par leur longueur (jusqu'à ~ 6 km) peu pertinents, et ce d'autant plus que de fortes pentes marquent l'ensemble du territoire. L'utilisation d'une distance maximale de marche c définissant une région $A := A_i^{sp}(c)$ constitue à ce titre une approche plus judicieuse. La figure 1.13 expose les résultats avec $c = \{500, 750, 1000, 1500\}$ mètres (de haut en bas). La colonne de gauche représente une approche par pedsheds (I à IV) et celle de droite \bar{s}_i^A (V à VIII). Afin de pouvoir comparer les deux approches, les résultats sont mis en classes par quantiles (8 classes représentant chacune 12.5% des immeubles habités).

Visuellement les différentes cartes présentent des jeux de contraste similaires allant dans le même sens que la figure 1.11 (p. 19). La représentation de \bar{s}_i^A à différentes échelles relate des variations locales plus marquées où des valeurs faibles et fortes se côtoient amenant à un rendu visuel granuleux. Comme on pouvait s’y attendre, \bar{s}_i^A diminue lorsque c augmente. La majorité des points appartenant à une classe de valeurs élevées ou forte à 500m (V) le demeurent également à 1500m (VIII). Cela indique que c’est principalement la morphologie locale ($A_i^{sp}(500)$) du réseau qui conditionne cette appartenance. Une analyse de \bar{s}_i^A à 500 m est ainsi suffisante pour détecter les zone de faible ou de forte connectivité, et nécessite un temps de calcul bien moindre que pour c plus grand (~ 1.4 millions de paires de points à 500 m contre ~ 11.7 millions à 1500 m). On notera toutefois que certains points passent d’une classe de valeurs faible à forte. C’est par exemple le cas de la région de Bellevaux-Rouvraie (17) qui dispose d’une faible sinuosité et donc d’une bonne connectivité lorsque $c=500$ m, alors que ce n’est plus le cas lorsque $c \geq 1000$ m (VII).

L’approche par pedshed (I à IV) révèle des zones plus continues où les voisinages de points tendent à avoir des valeurs proches. Plus c augmente, plus la valeur des classes augmente. Les points subsistant dans une même classe ou passant d’une valeur faible à forte illustrent le fait que plus on s’éloigne d’un lieu plus la marchabilité augmente, c’est-à-dire qu’on accède à un réseau plus développé. Les valeurs faibles tendent à se regrouper dans la périphérie. Dans le Sud, de la Bourdonnette (1) à Montchoisi, elles découlent de l’absence de chemin piéton sur le lac Léman. Au Nord, le Bois-de-Sauvabelin (18) et le Bois-Mermet (17) ne disposent que de peu de chemins à comparer de leur surface et provoquent le même phénomène dans les quartiers adjacents. Outre ces limitations naturelles, l’autoroute (19 à 22) et l’aéroport (19) représentent également un obstacle à la marche piétonnière. À cela s’ajoute un facteur plus global et technique, à savoir que les données réseau sont incomplètes pour les régions situées à l’extérieur du territoire communal. Cet effet de bord pourrait être diminué en améliorant la qualité du réseau hors commune. L’idée de tenir compte des surfaces $A_i^{sp}(c)$ et $A_i^e(c)$ recouvrant uniquement le territoire communal pourrait être explorée.

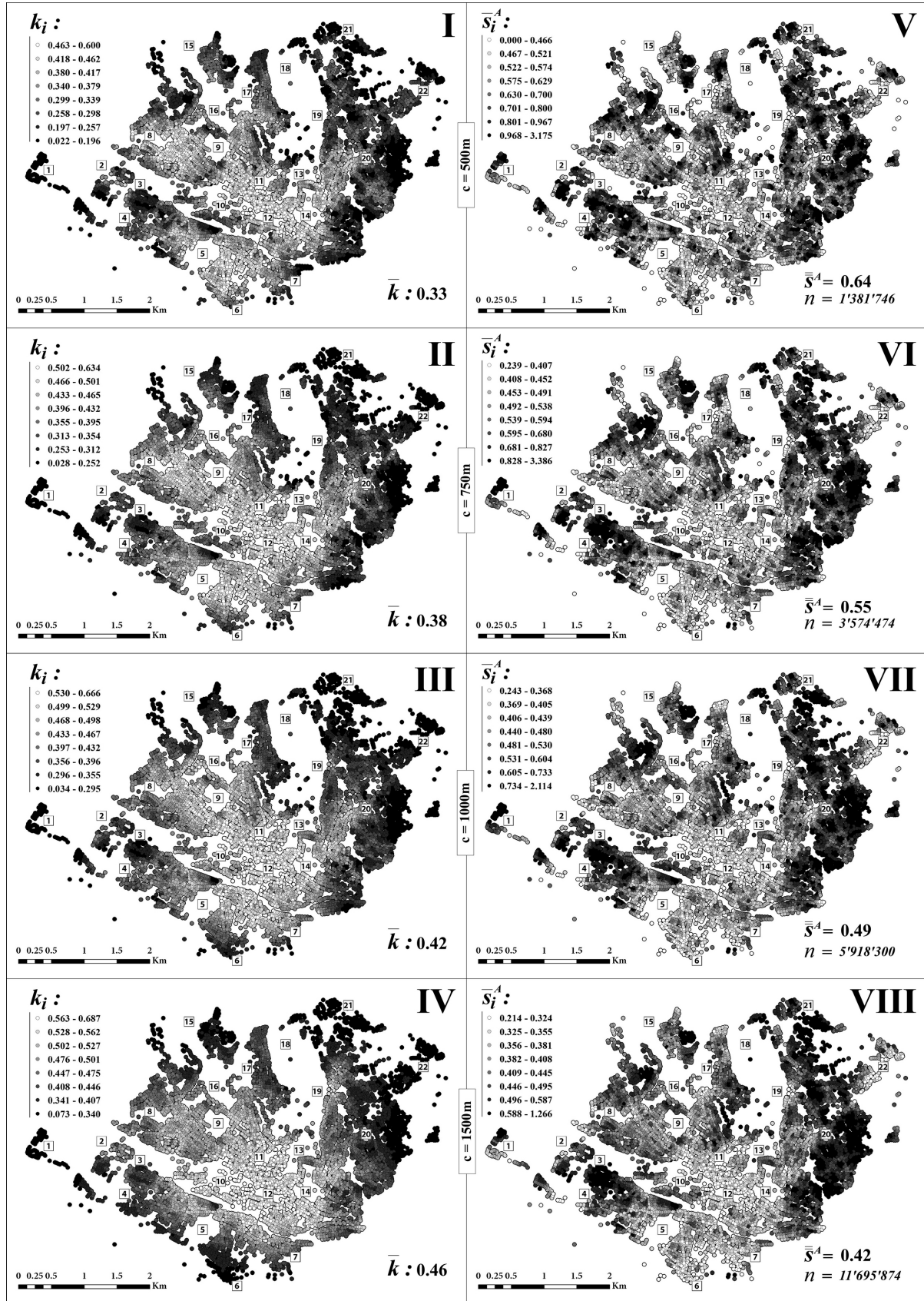


FIGURE 1.13 Comparaison de l'approche par pedshed (colonne de gauche) et de \bar{s}_i^A (colonne droite), où $A = A_i^{sp}(c)$ avec $c = \{500, 750, 1000, 1500\}$. n indique le nombre total de paires de distances calculées.

De manière globale, les valeurs de \bar{s}^A indiquent que les trajets inférieurs à 500m sont en moyenne 1.64 fois plus longs à pied qu'à vol d'oiseau (V), et 1.49 fois plus longs pour ceux inférieurs à 1000 m (VII). En prenant en compte l'ensemble des paires de points cette valeur est de 1.3 (fig.1.11). À titre de comparaison cette valeur est de 1.2 dans le cas d'un réseau parfaitement symétrique en forme de grille. La marchabilité moyenne $\bar{k}(c)$ quant à elle augmente lors c croît et passe ainsi de 0.33 à (500m, I) à 0.46 (à 1500m ; IV). Cela signifie que depuis sa position et dans un rayon de 500 m, le réseau offre en moyenne à un piéton une surface de marche 3 fois plus petite (~ 2 fois plus petite à 1500m) que s'il disposait d'une liberté totale de déplacement. Dans le cas de Lausanne, plus c est grand plus on accède à un réseau piéton développé. Cela a pour effet de faire diminuer \bar{s}^A tandis que la marchabilité $\bar{k}(c)$ augmente. Bien que les méthodes mises en place mériteraient d'être appliquées à d'autres cas d'étude, nos travaux ont tenté de montrer que l'étude de la sinuosité fait surtout sens lorsque différentes échelles spatiales sont prises en considération. Les fortes variations observées localement ont un impact direct sur la mobilité piétonne. Elles ont été ainsi investiguées et mises en relation avec la géométrie du réseau sous-jacent afin d'en évaluer la connectivité et d'en suggérer de possible(s) amélioration(s). Que ce soit dans une perspective d'"état-des-lieux" ou de planification, la sinuosité a toute sa place dans les études urbaines, les champs d'application sont nombreux : détection de raccourci, évaluation de la connectivité d'un futur quartier à l'environnement existant, ou encore marchabilité autour d'un centre d'intérêt (école, hub de transport, commerce,...). Pour aller plus loin et en guise de perspectives, évoquons encore quelques travaux initiés mais inachevés.

1.4 Perspectives et conclusion

Pour clore ce chapitre, mentionnons ici deux autres champs d'application constituant de possibles pistes de recherche. Dans le premier cas, l'idée est d'appliquer l'indice de sinuosité pour étudier et cartographier la sinuosité même d'un itinéraire. Le deuxième cas développe des considérations sur ce même indice dans le contexte d'un réseau orienté.

1.4.0.1 Géométrie et sinuosité d'itinéraire(s)

Jusqu'à présent, les approches ont principalement reposé sur la sinuosité entre deux points sans, justement, en considérer l'entre deux. Il convient ainsi de s'intéresser à la géométrie même d'un ou de plusieurs itinéraires. La figure 1.14 (gauche) propose quatre itinéraires $A=\{I, II, III, IV\}$ longs de 1.5km (d_{ij}^{sp}) entre deux points i, j distants

de 1km d_{ij}^e , d'où $s_{ij} = 0.5$; des parcours géométriquement différents peuvent ainsi avoir la même valeur de s_{ij} . Pour tenter d'identifier, de visualiser et de quantifier ces différences, deux approches sont ici proposées. Le traitement initial est identique, il consiste à déposer des points à intervalles réguliers au long de chaque itinéraire (fig. 1.14, centre). La longueur des intervalles génériquement notés k,l est déterminée proportionnellement à la longueur totale du trajet. On choisira ici 2.5% soit 40 segments de 37.5m de long.

La première approche consiste à utiliser ces points pour segmenter l'itinéraire. La sinuosité de chaque segment s'_{kl} peut ainsi être calculée et cartographiée (droite). La sinuosité "locale" \bar{s}^A de l'itinéraire est obtenue par moyennisation de l'ensemble des s'_{kl} .

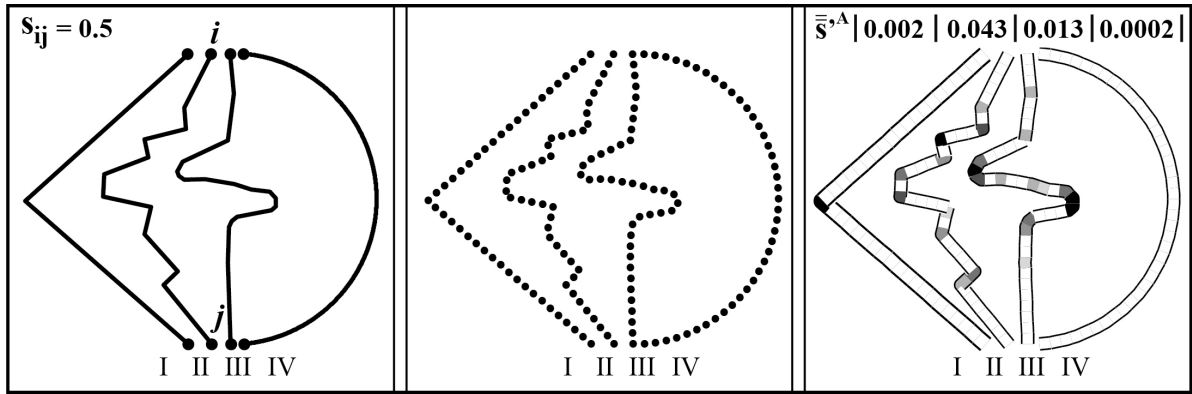


FIGURE 1.14 *Approche 1 : La segmentation d'itinéraire permet d'identifier les parties les plus sinueuses du tracé (la mise en classe des résultats est propre à chaque itinéraire). Les différentes valeurs de \bar{s}^A amènent à une possible distinction des itinéraires entre eux. L'arc de cercle a une sinuosité constante de 0.0002 par 37.5m alors que celle de l'itinéraire en équerre (I) est 10 fois plus grande (0.002). L'itinéraire II avec son décalage sur la gauche et ses multiples changements de direction obtient une valeur plus élevée (0.043) que le tracé en "S" (III). La méthode est bien évidemment tributaire de l'échelle utilisée pour segmenter les itinéraires.*

La deuxième approche utilise les points déposés le long d'un itinéraire pour calculer \bar{s}_i^A et \bar{s}^A . L'approche consiste ainsi à analyser la sinuosité moyenne d'un point par rapport à un nombre pair de plus proches voisins. La figure 1.15 (gauche) expose le cas d'un voisinage fait de 4 points. Les points étant disposés à équidistance, cela revient pour un point donné à considérer la sinuosité qu'il a avec les deux points proches situés en amont et les deux en aval. Les valeurs les plus faibles (en blanc) indiquent les positions les plus centrales dans le sens où l'accès aux points avoisinant peut se faire le plus en ligne droite. Les valeurs fortes tendent à se regrouper au sein ou à proximité des changements de direction. L'extension à un voisinage de 10 points

(centre) amène à un plus long continuum de valeurs fortes. Les résultats obtenus en considérant l'ensemble des points de l'itinéraire (droite) illustrent bien le concept de “straightness centrality” stipulant qu’être central c’est être relié aux autres en ligne droite. Sur les itinéraires proposés, les lieux les plus centraux (en blanc) sont ainsi situés aux points d’inflexions principaux du tracé.

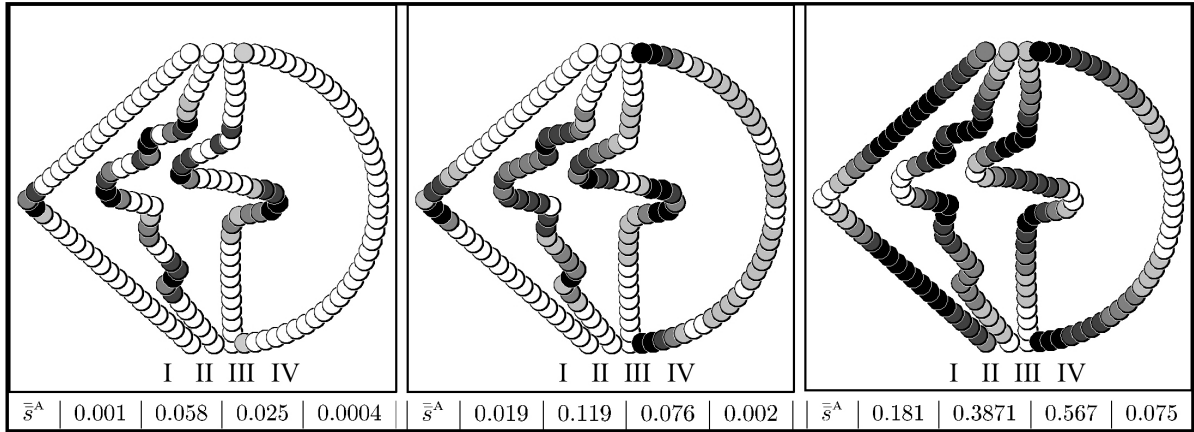


FIGURE 1.15 Approche 2 : \bar{s}_i^A et \bar{s}^A pour un voisinage de 4 points (gauche), 10 points (centre), et entre tous les points (droite).

Rappelons que sans segmentation ces itinéraires ont une sinuosité s_{ij} égale à 0.5. Quel que soit le mode de transport, les parcourir n’implique vraisemblablement pas le même vécu. L’indice \bar{s}^A peut ici être utilisé pour les “classifier”. L’arc de cercle et l’équerre obtiennent de loin les valeurs les plus basses. Les itinéraires II et III sont marqués par de plus nombreuses variations de tracé et ont ainsi des valeurs plus fortes. Bien qu’encourageantes, les démarches brièvement exposées ici n’ont pas été poursuivies. L’idée d’une sinuosité moyenne par x mètre ou kilomètre mériterait d’être développée et renvoie à l’analyse fractale (Mandelbrot, 1983). Plus globalement, la caractérisation et la cartographie de la sinuosité locale d’itinéraire aurait toute sa place dans les services online de création d’itinéraire, ou encore au sein des outils d’aide à la navigation routière.

1.4.0.2 Réseau orienté

Les réseaux routiers sont potentiellement plus affectés par le phénomène de détour. Les routes à sens unique ainsi que le fait de pouvoir tourner ou non aux intersections en sont les causes principales. L’indice de sinuosité peut être calculé pour identifier les bâtiments les plus affectés par ces restrictions inhérentes à ce type de réseau. Dans ce but, le réseau piéton du Nord-Ouest a été orienté de la façon suivante :

- Les routes à sens unique ainsi que leur sens de circulation ont été répertoriés
- Les restrictions de directions aux intersections n'ont pas été modélisées
- Les chemins uniquement piétonniers ont été rendus inaccessibles, hormis ceux représentant des voies d'accès à un ou plusieurs bâtiments.

Ce travail, effectué en 2011, a été accompli manuellement au vu des données accessibles existantes. En effet, les données TeleAtlas étaient trop imprécises et incomplètes, alors que OpenStreetMap était en plein développement rendant son intégration dans ArcGIS plus que rocambolesque. On notera à ce titre que les recherches académiques ayant recourt à OpenStreetMap sont de plus en plus nombreuses. Les requêtes « OpenStreetMap », « OpenStreetMap network » dans GoogleScholar retournent respectivement 2'640, 1480 résultats pour la période 2010-2011 et 6'060, 3'790 pour 2013-2014.

Le réseau routier mis en place est illustré dans la figure 1.16. Le but est ici de visualiser et de quantifier l'impact qu'a le sens de circulation des routes sur l'ensemble des trajets possibles entre tous les bâtiments du Nord-Ouest de la ville. Le calcul de $\delta(\bar{s}_i^A)$ indique si la sinuosité pour accéder à un point adresse depuis tous les autres est, en moyenne, plus grande ou plus petite que celle pour aller depuis ce point vers tous les autres. Une valeur positive représente une situation où les directions des routes induisent des trajets plus sinueux pour accéder à un lieu que pour s'en extraire, et inversement si elle est négative. Dans le cas présent, on observe globalement que le sens de circulation affecte principalement les bâtiments situés au long ou à proximité de sens unique et ont qu'un très faible impact sur certaines parties de la ville. Sur les 4'366 bâtiments, 78% obtiennent un score faible compris dans l'intervalle $-0.1 \leq \delta(\bar{s}_i^A) \leq +0.1$. Au-delà de ces bornes, l'amplitude des valeurs positives, négatives s'étend respectivement de +0.1 à +0.5, et de -0.1 à -1.1. Cette asymétrie indique que globalement le sens de circulation engendre en moyenne des itinéraires plus sinueux pour quitter les bâtiments que pour y accéder. Spatialement les valeurs les plus négatives sont principalement localisées dans le quartier de Valency (1) (ch. du Noirmont, du Risoux, de Renens), ainsi qu'au secteur allant de la Barre (2) au Pavement (3) (av. Louis Vuliemin), à Cécil et à l'Est du Petit-Chêne (ch. de Mornex) (5) et dans une moindre mesure à Bois-Gentil (6). Bien que plus éparpillées sur le territoire, les valeurs fortes positives sont observées dans les quartiers de l'av. de France et du Maupas (7), au Valentin et à la Pontaise (8). Les rues étroites et à sens unique du centre historique (9) amènent une situation où valeurs positives et négatives se côtoient. Les rues étroites à sens unique du centre historique confèrent aux bâtiments avoisinant des valeurs très variées de l'indice (de -0.5 à 0.3).

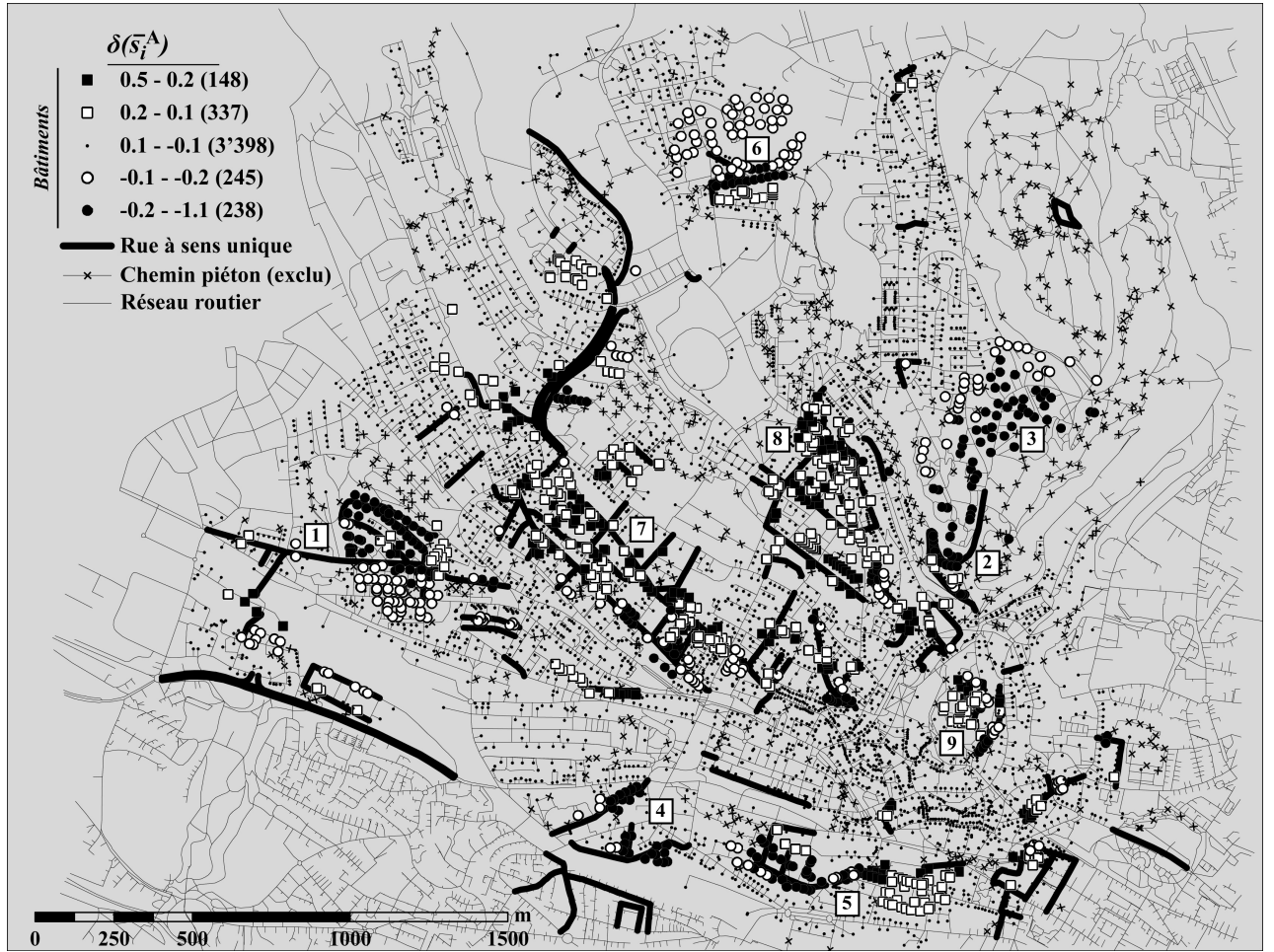


FIGURE 1.16 Cartographie de $\delta(\bar{s}_i^A)$ et du réseau orienté du Nord-Ouest de Lausanne. Pour un bâtiment donné, si $\delta(\bar{s}_i^A) > 0$ cela indique que les directions des routes induisent en moyenne des trajets plus sinueux pour y accéder que pour s'en extraire, et inversement si $\delta(\bar{s}_i^A) < 0$. Le détour moyen en mètres que cela représente sera défini (éq.2.8) et illustré ultérieurement (fig.2.6, p.43).

Ces quelques résultats sont obtenus uniquement sur les attributs géométriques du réseau. L'étude des réseaux routiers est toutefois plus complexe et ne peut pas véritablement se faire sans distinguer différentes fenêtres temporelles et sans en considérer les flux qui le traversent. Cette thématique, et plus généralement le cas des distances asymétriques, sont quelque peu périphériques aux problématiques scolaires et n'ont ainsi pas pu être plus profondément investiguées. On remarquera toutefois que l'indice présenté peut être utilisé pour comparer les cas orienté et non-orienté, ou autrement dit, pour comparer le réseau piéton au réseau routier.

Chapitre 2

Centralité de proximité : centricité(s) et eccentricité(s)

Par construction, la sinuosité n'apporte aucune information quant à la proximité ou à l'éloignement absolu d'un point par rapport à un autre. Ce chapitre propose ainsi de s'en tenir uniquement à l'analyse de distance(s) d_{ij} entre une ou plusieurs paires de points i, j . L'approche présentée ici s'inspire du modèle gravitaire où l'intensité d'une relation entre deux points dépend à la fois de leur poids et de la distance qui les sépare. Plus cette distance est petite et le poids important, plus l'intensité est forte, ou autrement dit, l'intensité décroît avec la distance. Les analyses qui en découlent renvoient ainsi à une conception de la centralité, sans doute la plus intuitive, où être central c'est être proche des autres. Corollairement, être eccentricité c'est en être loin. Le concept de centralité est multiple : le chapitre précédent l'a abordé du point de vue de la sinuosité, alors que celui-ci propose de le faire sur la base de la proximité. Pour éviter toute confusion de langage, on utilisera les adjectifs centrique, eccentricité et les termes centricité, eccentricité au singulier ou au pluriel pour désigner et caractériser la bi-polarité de cette "centralité de proximité".

La centralité de proximité, ou "closeness centrality", a intéressé les chercheurs d'horizons différents depuis la fin des années 40 (Bavelas, 1948, 1950; Sabidussi, 1966; Shimbel, 1953). Dans leur continuité, Freeman (Freeman, 1977, 1979) opère un travail de synthèse et propose trois indices dont la "closeness centrality" (les deux autres étant la "degree" et "betweenness centrality"). Ces indices trouveront leur place dans l'analyse des réseaux urbains principalement dans les années 2000 avec le développement des SIG, et sans doute sous l'impulsion de la théorie des "Small World" (Watts & Strogatz, 1998), comme en témoignent par exemple les recherches de Latora (Latora & Marchiori, 2001, 2002, 2007), et par la suite, celles de (Batty, 2005; Crucitti et al.,

2006; Porta et al., 2006, 2008, 2009; Sevtsuk & Mekonnen, 2012). On mentionnera également l'utilisation de ces indices de centralité pour l'étude des réseaux de transports suisses réalisée par Erath et al. (2009).

Tout comme le précédent, ce chapitre propose une étude multi-échelle de la centralité de proximité sur l'ensemble de 7'811 bâtiments habités de la ville. La section 2.1 présente le formalisme des indices de centricité, d'eccentricités et de détour. Ils sont respectivement développés dans les sections intitulées "Centricité : fonctions décroissantes de la distance" (2.2), "Eccentricité : fonctions croissantes de la distance" (2.3) et "Indice de détour" (2.4).

2.1 Indices de centricité et d'eccentricité

À tout trajet peut être associé un certain "coût" soit-il spatial ou temporel (distance ou temps de parcours), financier ou encore énergétique. Par exemple, le nombre de litres d'essence consommé et les taxes autoroutières augmentent avec la distance de parcours, alors que la concentration du conducteur et la valeur du véhicule diminuent. Dans une autre perspective, celle qui nous intéresse ici, on peut dire que l'énergie d'un piéton diminue avec la distance, c'est-à-dire que plus il marche plus il se fatigue. Méthodologiquement, la prise en considération de coûts croissants ou décroissants peut se faire au travers de fonctionnelles de la distance d ($= d_{ij}^e$ ou d_{ij}^{sp}). $F(d)$ indique une fonction décroissante alors que $G(d)$ désigne une fonction croissante. Ces deux familles de fonctions ont pour effet de transformer la distance hormis dans le cas de la fonction identité $G(d) = d$. Elles permettent de définir un indice de centricité (2.1) dans le cas de $F(d)$, et un indice d'eccentricité (2.2) dans le cas de $G(d)$.

Formellement et à échelle ponctuelle, la centricité moyenne \bar{c}_i^A et l'eccentricité moyenne \bar{e}_i^A d'un point i situé dans une région A sont données par la moyenne pondérée à tous les autres :

$$\bar{c}_i^A := \sum_{j \in A} f_j^A F(d_{ij}) \quad (2.1)$$

$$\bar{e}_i^A := \sum_{j \in A} f_j^A G(d_{ij}) \quad (2.2)$$

Une valeur forte de \bar{c}_i^A représente le cas d'un bâtiment situé en moyenne à faible distance d'autres bâtiments. Cette valeur est d'autant plus forte que ces autres bâtiments sont peuplés. Elle dénote ainsi d'une position centrique, alors qu'une valeur faible indique une position eccentricité. À l'inverse, une valeur forte de \bar{e}_i^A indique quant à elle une position eccentricité et une valeur faible relate une position centrique. À échelle régionale, la centricité moyenne et l'eccentricité moyenne d'une région A sont

déterminées par :

$$\bar{c}^A := \sum_{i,j \in A} f_i^A f_j^A F(d_{ij}) \quad (2.3)$$

$$\bar{e}^A := \sum_{i,j \in A} f_i^A f_j^A G(d_{ij}) \quad (2.4)$$

Afin de comparer des régions de tailles différentes, il est possible de normaliser ces indices par la surface $S(A)$, comme dans :

$$\bar{e}^{A} := \sum_{i,j \in A} \frac{f_i^A f_j^A d_{ij}^{sp}}{\sqrt{S(A)}} \quad (2.5)$$

Le formalisme des indices associé à un réseau orienté est le suivant :

$$\bar{e}_i^{A \text{ out}} := \sum_{j \in A} f_j^A G(d_{ij}^{sp}) \quad (2.6) \quad \bar{e}_i^{A \text{ in}} := \sum_{j \in A} f_j^A G(d_{ji}^{sp}) \quad (2.7)$$

$$\delta(\bar{e}_i^A) := \bar{e}_i^{A \text{ in}} - \bar{e}_i^{A \text{ out}} \quad (2.8)$$

Pour un point i donné, $\delta(\bar{e}_i^A)$ mesure la différence moyenne entre la longueur des trajets pour aller vers les autres points avec celle pour en revenir. Si $\delta(\bar{e}_i^A) > 0$ cela signifie que la longueur des trajets pour accéder à i est en moyenne plus longue que pour en sortir. Et inversement si $\delta(\bar{e}_i^A) < 0$. Dans le cas d'un réseau non-orienté, le détour peut être envisagé comme la différence à l'optimal euclidien (d_{ij}^e). Par analogie avec (2.7), l'eccentricité euclidienne moyenne d'un point i est ainsi définie par :

$$\bar{e}_i^{A \text{ eucl}} := \sum_{j \in A} f_j^A G(d_{ij}^e) \quad (2.9)$$

Le détour moyen Δ associé à $\bar{e}_i^{A \text{ eucl}}$ d'un point i est mesuré par :

$$\Delta^{\text{in}}(\bar{e}_i^A) := \bar{e}_i^{A \text{ in}} - \bar{e}_i^{A \text{ eucl}} \quad (2.10) \quad \Delta^{\text{out}}(\bar{e}_i^A) := \bar{e}_i^{A \text{ out}} - \bar{e}_i^{A \text{ eucl}} \quad (2.11)$$

Par construction $\Delta^{\text{in}}, \Delta^{\text{out}} \geq 0$.

Dans le cas d'un réseau non-orienté :

$$\Delta(\bar{e}_i^A) = \Delta^{\text{in}}(\bar{e}_i^A) = \Delta^{\text{out}}(\bar{e}_i^A) \quad (2.12)$$

Une faible valeur de $\Delta(\bar{e}_i^A)$ témoigne du fait qu'en moyenne la longueur des trajets d'un point à tous les autres au travers du réseau correspond quasiment à la situation optimale d'une connection en ligne droite.

Le formalisme associé aux fonctions décroissantes $F(d)$ peut être obtenu en substituant G par F dans (2.6), (2.7), (2.9) afin de calculer $\bar{e}_i^{A \text{ out}}$, $\bar{e}_i^{A \text{ in}}$ et $\bar{e}_i^{A \text{ eucl}}$ ainsi que les indices qui en découlent ((2.8), (2.10) et (2.11)).

L'ensemble du formalisme proposé ci-dessus offre un large panel d'analyses qui ne sera pas entièrement développé par la suite. La section 2.2 développe et illustre l'utilisation de fonctions de décroissance exponentielles ($F(d)$) pour mesurer la centralité de proximité entre les bâtiments habités de la ville. La section suivante (2.3) est consacrée au cas particulier de la fonction identité $G(d) = d_{ij}^{sp}$, et propose différentes échelles d'analyses fondées sur une distance de marche maximale. En guise de synthèse et de conclusion, le krigeage pour cartographier les empreintes des principaux indices développés dans ces deux premiers chapitres consacrés au principe de la centralité.

2.2 Centricité : fonctions décroissantes de la distance $F(d)$

La proximité d'un lieu de destination est une composante importante de notre vie quotidienne de piéton. Cela se manifeste typiquement lorsqu'on se dit : "Ah c'est trop loin, je prends le bus", ou à l'inverse, "c'est tout près, j'y vais à pied". Ce "tout près" et ce "trop loin" sont complexes à modéliser car ils mettent en jeu des facteurs d'ordre très différents. On mentionnera par exemple des facteurs d'ordres physiologiques (état de santé, âge, poids) et motivationnels propres à l'individu, et d'autres propres à son environnement, tels que les conditions météorologiques, le fait qu'il fasse jour ou nuit, la présence d'autrui, le relief et l'architecture de la ville, ou encore l'existence d'un

réseau piéton bien développé. La littérature et les modèles liés à la mobilité piétonne sont de ce fait abondants. Cela amène notamment Rudloff et al. (2011) à s'interroger : "can walking behavior be predicted?". On laissera ici au lecteur le soin de répondre à cette question épistémologique-méthodologique...

Qui dit mobilité dit mouvements. Mouvements de foule ou individuels, générés par les passants qui fluent dans les artères et les capillaires de la ville. Autant de cheminements rythmés par l'alternance d'espaces de liberté et de promiscuité, de flux qui divergent ou qui convergent vers des lieux ou des centres d'intérêts aussi bien personnels et collectifs qui constituent et animent les cœurs de la Cité.

Par définition un flux a une certaine vitesse. Anatomiquement parlant, la vitesse

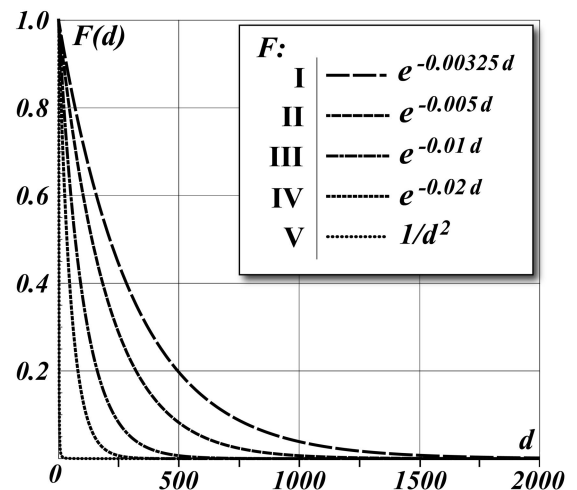


FIGURE 2.1 $F(d)$

de marche d'un adulte est comprise entre 4 et 5 km/h (Sun et al., 1996)(Carey, 2005). Dans une perspective sociale et médicale, la marche à pied est globalement vue sous l'angle de l'activité physique en considérant typiquement un temps de marche quotidien entre différentes classes d'âge et catégories sociales (Sundquist et al., 2011). Dans un contexte urbain la vitesse d'un piéton n'est pas constante, elle est par exemple modulée lorsqu'on traverse une route (Chandra & Bharti, 2013)(Montufar et al., 2015), lorsqu'on s'approche et qu'on croise une ou plusieurs personnes (Werberich et al., 2014) ou encore lorsqu'on qu'on doit faire face à rues des lieux bondés (Duives et al., 2013). On mentionnera ici l'article de (Gupta & Pundir, 2015) offrant une vision synoptique des "principaux" modèles de flux piétonniers.

L'approche proposée ici a principalement pour but de mettre en avant les caractéristiques géométriques du réseau et non d'y simuler à proprement parlé des flux ou le comportement des piétons qui le traversent. En l'occurrence, on ne considèrera ici que le fait que plus un piéton marche plus il se fatigue. Autrement dit, son énergie baisse avec la distance. Cette baisse de régime peut être très rapide ou plus lente. Au final, une personne se fatiguant plus rapidement ira moins loin qu'une autre plus endurante. Des fonctions de type exponentielles $e^{-\lambda d}$ (où $\lambda > 0$ est un paramètre libre) sont utilisées à titre expérimental pour modéliser ce phénomène de friction de la distance et sont illustrées dans la figure 2.1¹. Plus la valeur de λ est basse (I) plus la décroissance est lente. Chacun des tracés décroît jusqu'à une certaine distance où "c'est trop loin" ($F(d) \approx 0$). En l'occurrence pour les fonctions I à IV cette distance est respectivement d'environ 1500, 1000, 500, 250 m. Au-delà de cette "limite", la valeur de $F(d)$ devient très faible mais non nulle : le piéton conserve ainsi toujours un zeste d'énergie pour aller plus loin.

De manière générale, ces fonctions décroissantes jouent le rôle de potentiel du modèle gravitaire, elles ont pour effet de mettre en avant la proximité en favorisant les courts trajets (valeur de $F(d)$ élevée), et de pénaliser les plus longs (valeur de $F(d)$ faible). À l'inverse, les fonctions croissantes permettent quant à elles de caractériser l'excentricité (valeur de $G(d)$ élevée) en pénalisant les courts trajets (valeur de $G(d)$ faible).

Les résultats de \bar{c}_i^A obtenus en considérant l'ensemble des distances du plus court chemin entre toutes les paires de bâtiments de la ville sont exposés dans la figure 2.2. La colonne de gauche représente le cas où $\lambda = 0.02$ et celle de droite $\lambda = 0.00325$. Les

1. Les fonctions de décroissance exponentielles se retrouvent par exemple chez Buchmueller & Weidmann (2006) et Twarogowska et al. (2014). L'idée véhiculée est que la vitesse d'un flux décroît de manière exponentielle avec la densité piétonne. Autrement dit, plus les piétons sont proches et nombreux plus ils sont ralentis dans leur déplacement respectif.

cartes I et II relatent le cas d'une pondération uniforme, alors que pour II et IV les analyses sont pondérées par la population résidant dans chaque immeuble.

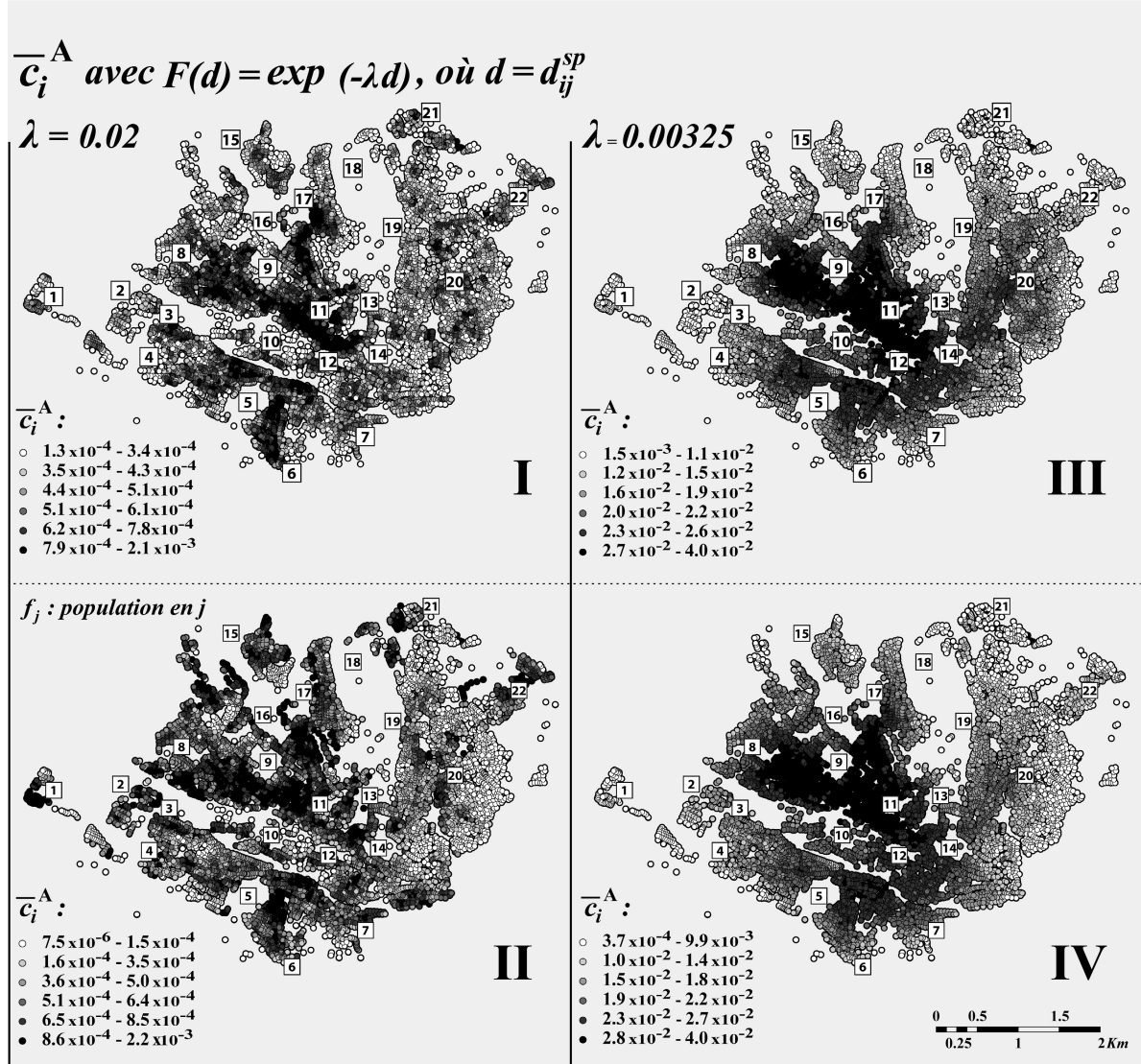


FIGURE 2.2 Exemple de $F(d)$ de type $\exp(-\lambda d^{sp})$ avec $\lambda=0.02$ (I,II) et $\lambda=0.00325$ (III,IV). Pour II et IV, le calcul de \bar{c}_i^A tient compte de la population résidant dans chaque bâtiment.

L'utilisation de frictions exponentielles de la distance permet de faire apparaître une multitude de maxima locaux répartis sur l'ensemble de la cité (I, II). Ces centricités tendent à se regrouper dans différentes parties du territoire. Se distingue ainsi l'axe allant de la Rue de Bourg aux Bergières et l'axe Riponne (11) - Bellevaux (17). Ces valeurs fortes indiquent les régions où les bâtiments sont situés à proximité les uns des autres. Cette proximité est rendue possible par un réseau piéton localement bien

développé et dont le tracé des routes est peu sinueux. Dans le Sud, cela peut être observés dans les quartiers sous-gare environnant la place de Milan (5) ainsi qu'à Provence (3). Comme vu précédemment (fig. 1.13 page 22), le phénomène de sinuosité est particulièrement marqué dans l'Est et la densité de construction y est plus faible que dans le reste de la ville. En conséquence, le jeu de contrastes est beaucoup plus mixte, valeurs faibles et fortes ayant tendance à être mélangées. Dans le cas pondéré (II) le pattern obtenu présente un autre aspect. Les valeurs élevées de l'indice dénotent d'une bonne proximité entre des bâtiments fortement peuplés. Elles apparaissent ainsi dans les quartiers périphériques à forte densité de la Boudonnette (1), de la Blécherette, de Bois-Gentil, des Bossons, du Désert (entre 15 et 16), de Grand-Vennes (21), de Praz Séchaud et de Valmont (22). Le plus gros regroupement englobent les quartiers allant de Valency à la Riponne et ceux de la Riponne à la Pontaise. Dans le Sud, se démarquent les quartiers à droite de la Place de Milan (5) (Boulevard de Grancy, Av. de la Harpe, Av. d'Ouchy) et plus loin Montchoisi et Chissiez (7), alors qu'à l'Est se démarque le duo La Sallaz (19) - Chailly (20). À l'inverse les valeurs faibles dénotent d'un tissu urbain plus détendu où les bâtiments sont moins peuplés et plus éloignés les uns des autres. Ces caractéristiques sont typiques des zones contenant des villas ou de petits immeubles. On mentionnera au Nord le secteur de Bois-Gentil (15) qui présente un net contraste entre sa partie haute plus densément construite et peuplée que sa partie basse constituée principalement de villas.

L'utilisation d'une fonction plus faiblement décroissante (III, IV) amène à considérer des distances plus grandes entre paires de bâtiments, c'est-à-dire à procéder à un changement d'échelle. Le pattern résultant révèle des zones plus continues, où les voisinages de points tendent à avoir des valeurs plus proches que dans I et II. On y observe en effet une seule région centrique s'étendant de St-François (12) / Mon-Repos (14) au parc de Valency (8) et autour de laquelle se déploient des valeurs de plus en plus faibles. Lointains, les quartiers périphériques obtiennent ainsi les valeurs les plus faibles qui témoignent d'une position excentrique à cette échelle d'analyse. Le cas pondéré (IV) révèle un assez fort contraste entre l'Est et l'Ouest. À comparer de la carte III, on remarque un décalage du pattern en direction du Nord-Ouest en raison de la forte densité de construction et de population résidente caractérisant cette partie de la ville.

Un lieu est dit accessible s'il peut être atteint facilement depuis un ou plusieurs autres lieux. Le fait que ces autres soient nombreux et peuplés peut représenter ou non un intérêt. Il est par exemple souhaitable que les commerces de proximité ou les arrêts de bus de la ville soient au plus près du plus grand nombre d'habitants.

Les localisations satisfaisant ce souhait correspondent aux valeurs fortes de \bar{c}_i^A de la carte II. Dans une vision où “l’enfer c’est les autres...voisins”, une personne cherchant un lieu de domicile pour être au calme cherchera possiblement un lieu plutôt isolé dans son environnement immédiat, mais bénéficiant tout de même d’un accès facilité au reste de la ville. Cela revient à considérer les points qui sont blancs en II et qui deviennent noirs en IV. En l’occurrence, il s’agit notamment des rares logements de la vallée du Flon s’étendant de Sébeillon (entre 3 et 10) à St-François (12), de ceux du quartier paisible du Languedoc (entre 3 et 5) ou encore des habitations situées à l’av. du Grey (entre 16 et 8). Les points blancs en II et restant blancs en IV pointent quant à eux les habitations marquées d’un isolement spatial et démographique. Eu égard de ces brefs exemples et possibles interprétations, ces cartes illustrent l’accessibilité des différents bâtiments pour un piéton ayant une faible autonomie de marche (I, II), ou une meilleure endurance (III, IV).

Numériquement les valeurs obtenues sont très faibles. Les fonctions décroissantes de la distance attribuent des valeurs plus élevée aux courts trajets. Toutefois, sur les quelques 60 millions de paires de bâtiments impliquées dans l’analyse, seules 1.4 millions d’entre elles ont une distance de moins de 500m (fig.1.13 page 22). Le reste, l’immense majorité, obtient ainsi des valeurs très faibles engendrant des valeurs de \bar{c}_i^A quasi-nulle.

2.3 Eccentricité : fonctions croissantes de la distance $G(d)$

Formellement, les fonctions croissantes ont pour but de caractériser l’eccentricité en pénalisant les courts trajets à la faveur des plus longs, ces derniers obtenant de facto les valeurs les plus hautes de $G(d)$. Corollairement, les valeurs les plus basses indiquent les positions les plus centriques. On s’en tiendra ici aux cas particuliers où $G(d) = d_{ij}^{sp}$ ou $G(d) = d_{ij}^e$. Par définition la fonction identité permet de rester dans un système métrique intuitif où \bar{e}_i^A indique simplement la distance moyenne pondérée en mètres d’un point i à tous les autres.

La figure 2.3 expose les résultats obtenus avec $G(d) = d_{ij}^e$ (I) et $G(d) = d_{ij}^{sp}$ (II) et avec pondération par la population de chaque bâtiment (III). En toute logique, l'utilisation de la distance euclidienne (I) produit un pattern parfaitement concentrique auréolé des constructions les plus eccentrices. Il correspond à l'optimal mathématique où tous les bâtiments seraient reliés en ligne droite (sinuosité nulle). Le centre moyen tombe au Nord de la place de la Riponne. Par définition il représente le bâtiment de la ville dont la distance à vol d'oiseau moyenne à tous les autres est la plus petite, en l'occurrence 1436 m. Cette propriété géométrique semble avoir été saisie par les nombreux volatiles nichant et fréquentant cette place et ses alentours ! La distance moyenne entre toutes les paires de points est quant à elle de 1'975 m. En considérant d_{ij}^{sp} (II), on observe que les limites des classes circulaires de la carte I se déforment. Cela est dû à la morphologie du réseau sous-jacent qui engendre des distances globalement plus grandes. En conséquence, les valeurs de l'indice sont plus hautes que celle de I avec et $\bar{e}^A = 2'486$ m. On observe également que le centre de la Cité se déplace légèrement vers le Sud, à la place de la Palud, entraînant avec lui l'ensemble du pattern. Avec une balance dans sa main gauche pour peser le pour et le contre, une épée dans la droite pour décider, la statue de la Palud incarne non seulement la justice, mais représente et symbolise également le centre géométrique du réseau piéton. La prise en

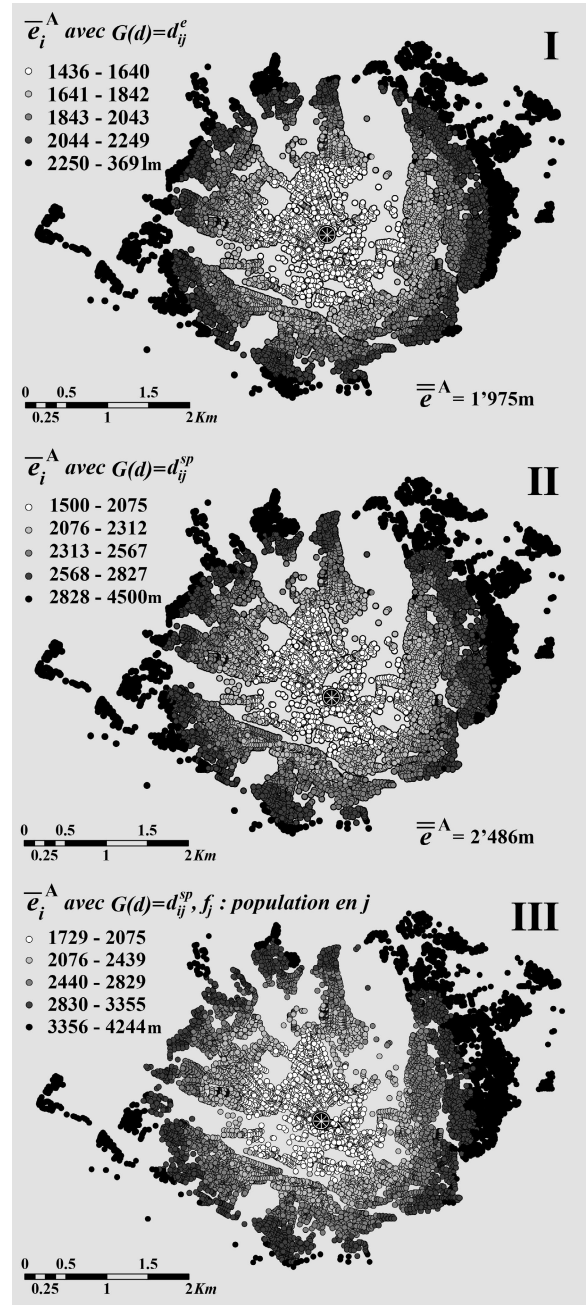


FIGURE 2.3 Cartographie de \bar{e}_i^A avec $G(d) = G(d) = d_{ij}^e$ (I), $G(d) = d_{ij}^{sp}$ (II : pondération uniforme, III : pondération par la population). Mise en classe par quantiles (5 classes de 1'556 bâtiments).

compte de la population (III) produit des résultats légèrement différents où, sous le poids de la forte population des quartiers environnants du Nord-Ouest (III), le pattern est comme attiré et translaté dans cette direction. Le centre est ainsi localisé au Sud de la Riponne, à l'entrée de plusieurs rues commerciales et non loin de bars à succès.

Pour l'anecdote, la somme de la distance entre tous les immeubles habités de la ville vaut environ 150 millions de kilomètres. Cette quantité astronomique correspond à la distance Terre-Soleil qui définit justement l'unité astronomique (UA). La configuration spatiale des lieux d'habitations et la morphologie du réseau piéton semblent ainsi avoir quelques célestes proportions apportant à Lausanne une dimension hélio-centrique insoupçonnée ! Ceci dit, un piéton marchant constamment à 4 km/h mettrait 4'280 ans pour parcourir cette distance.

La suite des analyses propose d'investiguer la centralité de proximité à des échelles plus locales et plus propices à l'étude de la mobilité piétonne. Dans un premier temps on utilisera la délimitation des quartiers statistiques afin d'en calculer pour chacun la distance moyenne entre tous les bâtiments (\bar{e}^A). Dans un deuxième temps et en complément à l'approche par $F(d)$, l'échelle est définie par une distance de marche maximale. On notera que la démarche et les échelles d'analyse sont les mêmes que celles réalisées dans le chapitre précédent (1.3.1, p.18). Aussi, pour rendre possible la comparaison avec la sinuo-centralité, les cartes présentées par la suite offrent un design similaire et les données sont mises en classe de manière identique (quantiles).

2.3.1 Résultats par quartier

Globalement et sans surprise, on observe (fig.2.4, I) que les quartiers de petites tailles sont ceux où la distance moyenne inter-bâtiments \bar{e}^A est la plus basse. Ils sont principalement localisés dans le Centre et dans le Nord du territoire. Environ la moitié des 81 quartiers ont une valeur $\bar{e}^A \leq 350$ m. Les quartiers où l'on est le plus susceptible de parcourir un long trajet pour aller d'un bâtiment à un autre sont principalement situés dans les grands quartiers de l'Est et du Nord-Est de la ville. Dans une moindre mesure cela est également le cas au Sud pour les quartiers situés au-dessous des rails s'étendant de Montoie (5) à Montchoisi (18). On remarquera que les quartiers présentant une géométrie longiligne comme Pierrfleur (64, Nord-Ouest) ou plus au Sud le couple Av.d'Echallens (68)/Av. de Morges (76) tendent à présenter également des valeurs assez élevées. Ce phénomène s'explique par le fait que ce type de géométrie englobe généralement une ou deux rues parallèles qui la traversent d'un bout à l'autre. Cela amène à une situation où l'éloignement entre les extrémités du quartier sera plus grand que pour une géométrie carréiforme de surface équivalente. Afin de tenir compte de l'hétérogénéité de la taille des quartiers, l'indice \bar{e}^A (éq.(2.5)) exprime le ratio entre la distance moyenne de marche au sein d'un quartier avec sa surface. Le pattern obtenu

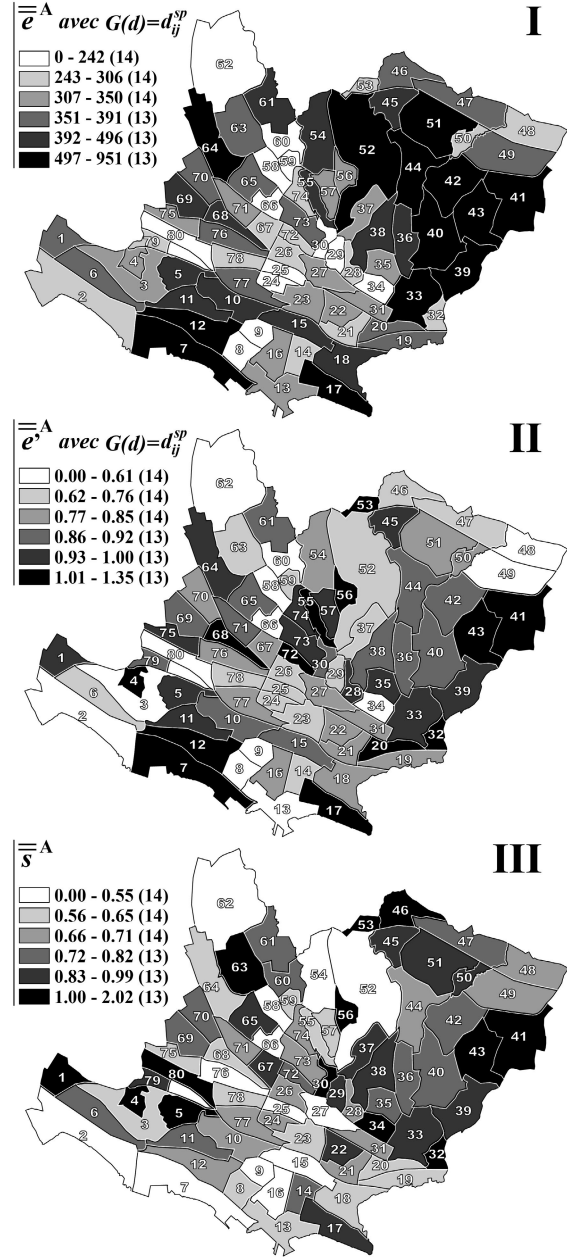


FIGURE 2.4 Distance de marche moyenne par quartier, sans (I : \bar{e}^A) et avec (II : \bar{e}^A) prise en compte de la surface du quartier. III : Sinuo-centralité \bar{s}^A (éq.1.7).

cir pour laisser le palmarès des plus hautes valeurs à ceux de petites tailles et, ou, aux quartiers longilignes. La mise en relation de I et II avec la sinuo-centralité (III) permet conceptuellement de faire un lien entre la connectivité du réseau et la distance moyenne de marche au sein d'un quartier. On remarque par exemple que Mon-Repos (34, Sud-Est) est marqué d'un manque de connectivité (III). Toutefois ce manque n'engendre pas une forte valeur des indices de I et II. Les cas méritant une attention particulière sont ceux obtenant des scores élevés des trois indices.

À noter qu'il faut bien garder en tête que dans cette approche les quartiers sont considérés indépendamment les uns des autres, ils sont comme déconnectés. Cela peut rapidement s'avérer problématique dans un environnement urbain continu. Le but est principalement d'obtenir une vision d'ensemble des différents indices tout en ayant conscience qu'un autre découpage du territoire pourrait présenter une vision des choses différente.

2.3.2 Résultats par distance de marche maximale

L'étude de \bar{e}_i^A apporte une vision plus détaillée. Il mesure la distance moyenne pondérée d'un point i à tous les autres situés à une distance de marche maximale de c mètres, avec $A = A_i^{sp}(c)$ (fig.5 droite, p.xxvi). Au-delà de cette limite, le piéton s'arrête net contrairement à l'approche par $F(d)$ (2.2, p.32). La figure 2.5 expose les résultats obtenus avec $c = \{500, 750, 1000, 1500 \text{ m}\}$ (de haut en bas) sans (gauche) et avec prise en compte de la population (droite). Les cartes illustrent à merveille la centralité de proximité au travers d'un jeu de contrastes entre centricités (en blanc) et eccentricités (en noir) faisant apparaître des patterns marqués d'un clair phénomène de polynucléisme. Ces différentes illustrations permettent de voir comment, où et à partir de quelle distance les différentes parties de la ville se distinguent, se lient, voire s'unissent les unes aux autres, ou au contraire s'isolent. On n'énumèrera pas ici l'ensemble des cas, on mentionnera simplement le fait que certaines parties de la ville qu'on qualifierait a priori comme centrales en fait ne le sont pas du tout. C'est par exemple le cas du CHUV (hôpital) (13), ou encore de la région allant de Montbenon (10) à St-François (12) (Gare comprise). Cela s'explique par le fait que ce sont des parties du territoire faiblement habitées comme en témoigne le vide qui les entoure et qui amène à leur isolement. Au même titre que la figure 2.2 (p.34), ces cartes représentent l'accessibilité piétonne des immeubles résidentiels de la ville.

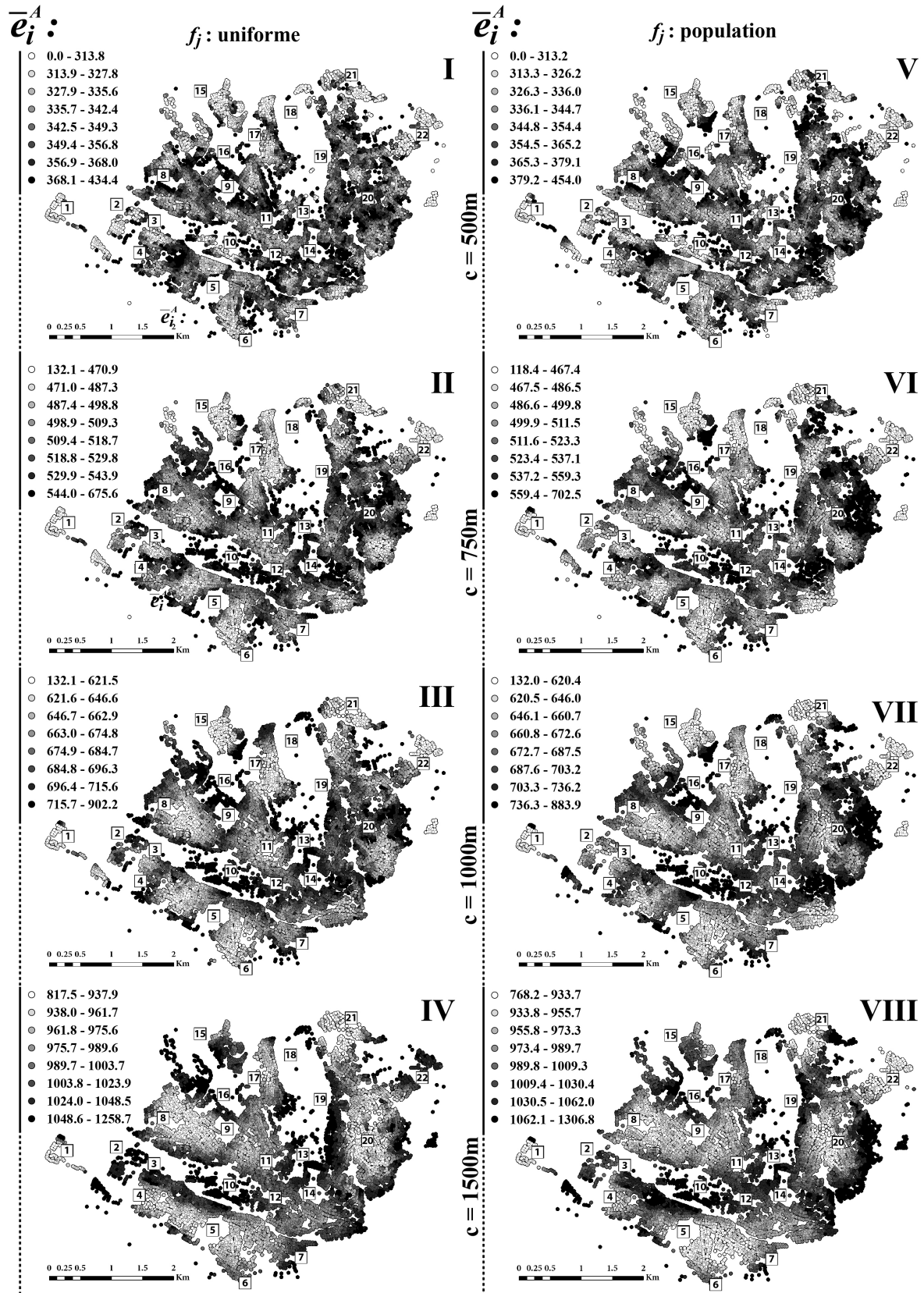


FIGURE 2.5 Cartographie de l'eccentricité \bar{e}_i^A avec une distance de parcours maximale (c) de 500, 750, 1000 et 1500 m (de haut en bas). La colonne de gauche expose le cas d'une pondération uniforme alors que celle de droite prend en compte la population résidant dans chaque bâtiment.

2.4 Indices de détour

Conceptuellement, un détour mesure la différence de longueur entre deux itinéraires d'origine i et de destination j identiques. L'indice $\Delta(\bar{e}_i^A)$ est construit sur la différence entre le trajet du plus court chemin d_{ij}^{sp} avec la distance euclidienne d_{ij}^e . $\delta(\bar{e}_i^A)$ quant à lui opère la différence entre la longueur du trajet retour d_{ji}^{sp} avec celle de l'aller d_{ij}^{sp} , présupposant ainsi un réseau orienté. $\Delta(\bar{e}_i^A)$ s'exprime en mètres et constitue un détour absolu.

La figure 2.7 (p.44) expose les résultats de $\Delta(\bar{e}_i^A)$ obtenus en considérant l'ensemble des bâtiments (pondération uniforme). La carte I reprend les résultats de sinuo-centralité (détour relatif) \bar{s}_i^A (fig.1.11 p.19). Ces indices étant définis à échelle ponctuelle, un krigeage² a été effectué afin d'en proposer une visualisation incluant le réseau piéton. On nommera ce type de visualisation par le terme "empreinte". Les zones claires de I indiquent que les bâtiments qui y sont situés sont en moyenne connectés plus en ligne droite aux autres bâtiments de la ville que ceux situés dans des zones foncées. Ce document offre ainsi un aperçu global de l'état de la connectivité du réseau piéton. Parallèlement, les zones claires de II indiquent que les bâtiments qui y sont situés ont en moyenne un détour à l'optimal moins long que ceux situés dans les zones foncées. Numériquement, certains bâtiments ont un détour moyen $\Delta(\bar{e}_i^A)$ jusqu'à ~4 fois plus élevé (1176 m) que ceux ayant les valeurs les plus basses (252 m). De façon plus détaillée, les deux cartes présentent un bassin de valeurs faibles recouvrant le Centre et le Sud-Est de la ville. La comparaison des jeux de contrastes entre les deux cartes révèle la présence d'un gradient d'éclaircissement émanant de la zone centrale. Il s'étend principalement dans le quart Nord-Ouest de la ville et de manière moins flagrante dans le Sud-Ouest. On remarquera également une inversion du contraste (blanc en I, noir en II) dans les quartiers périphériques de la Bourdonnette (tout à gauche) et de Praz-Séchaud (en haut à droite). Le chapitre précédent a montré que la sinuosité diminue avec la distance (fig.1.11 p.19 et fig.1.13 p.22). Si on imagine deux trajets long chacun de 500 et de 2000m, ayant une sinuosité de 0.5 et de 0.2, leur détour respectif sera alors de 250m et de 400m. Dans le cas de Lausanne et de manière générale, on peut ainsi s'attendre à ce que plus un itinéraire est long, plus la longueur du détour l'est également. Par définition, une position excentrique implique de longs trajets pour rallier les autres et donc un détour plus important qu'un point situé à proximité du centre géométrique du réseau. Dès lors, les quartiers situés en bordure de territoire présentent un détour moyen élevé, et ce malgré une sinuo-centralité faible. À

2. Réalisé dans ArcGIS avec les paramètres suivants : KrigingModelOrdinary / semivariogram-Type : SPHERICAL / cell_size : 5 / RadiusVariable ({numberofPoints :50}, {maxDistance :100m}).

l'inverse, le quart Nord-Ouest contient une multitude d'ilots marqués d'une sinuosité importante (I). Ce manque de connectivité n'a toutefois pas un impact majeur sur la longueur des détours qu'il génère (II, valeurs de $\Delta(\bar{e}_i^A)$ relativement basses). De fortes valeurs des deux indices permettent d'identifier les endroits pour lesquels le manque de connectivité du réseau induit des détours importants. Cela concerne principalement l'Est et le Nord-Est, et dans une moindre mesure la partie basse de la ville "isolée" par les rails.

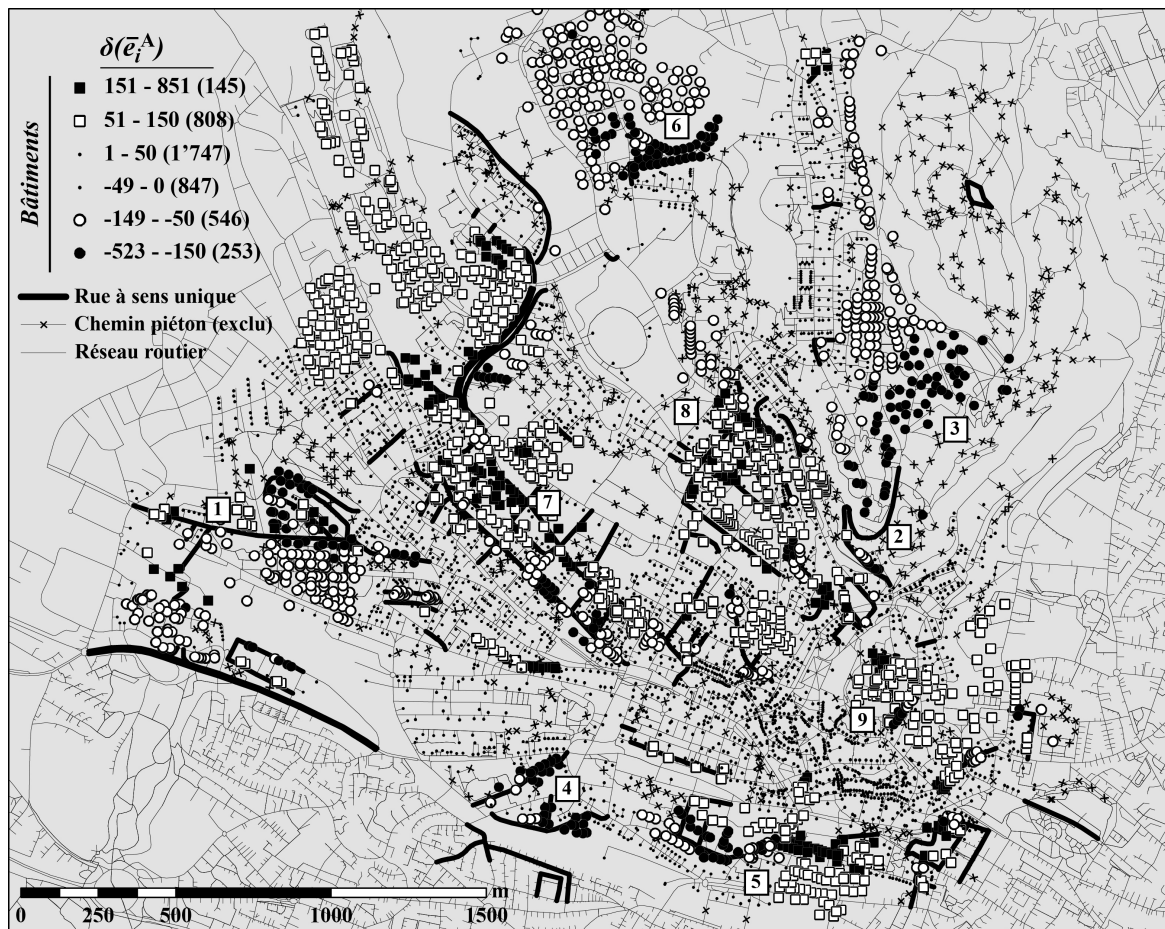


FIGURE 2.6 Cartographie de $\delta(\bar{e}_i^A)$ mesurant la différence entre la longueur moyenne des trajets retour et aller au travers du réseau orienté (en mètres). Si $\delta(\bar{e}_i^A) > 0$ cela signifie que la longueur des trajets pour accéder à i est en moyenne plus longue que pour en sortir. Et inversement si $\delta(\bar{e}_i^A) < 0$. L'indice permet ainsi d'évaluer l'impact (en mètres) des détours occasionnés par les des directions du réseau. Cette approche est complémentaire à la carte 1.16 (p.27) qui permet de savoir pour un bâtiment donné, si les itinéraires vers ou depuis les autres immeubles sont en moyenne plus ou moins sinueux.

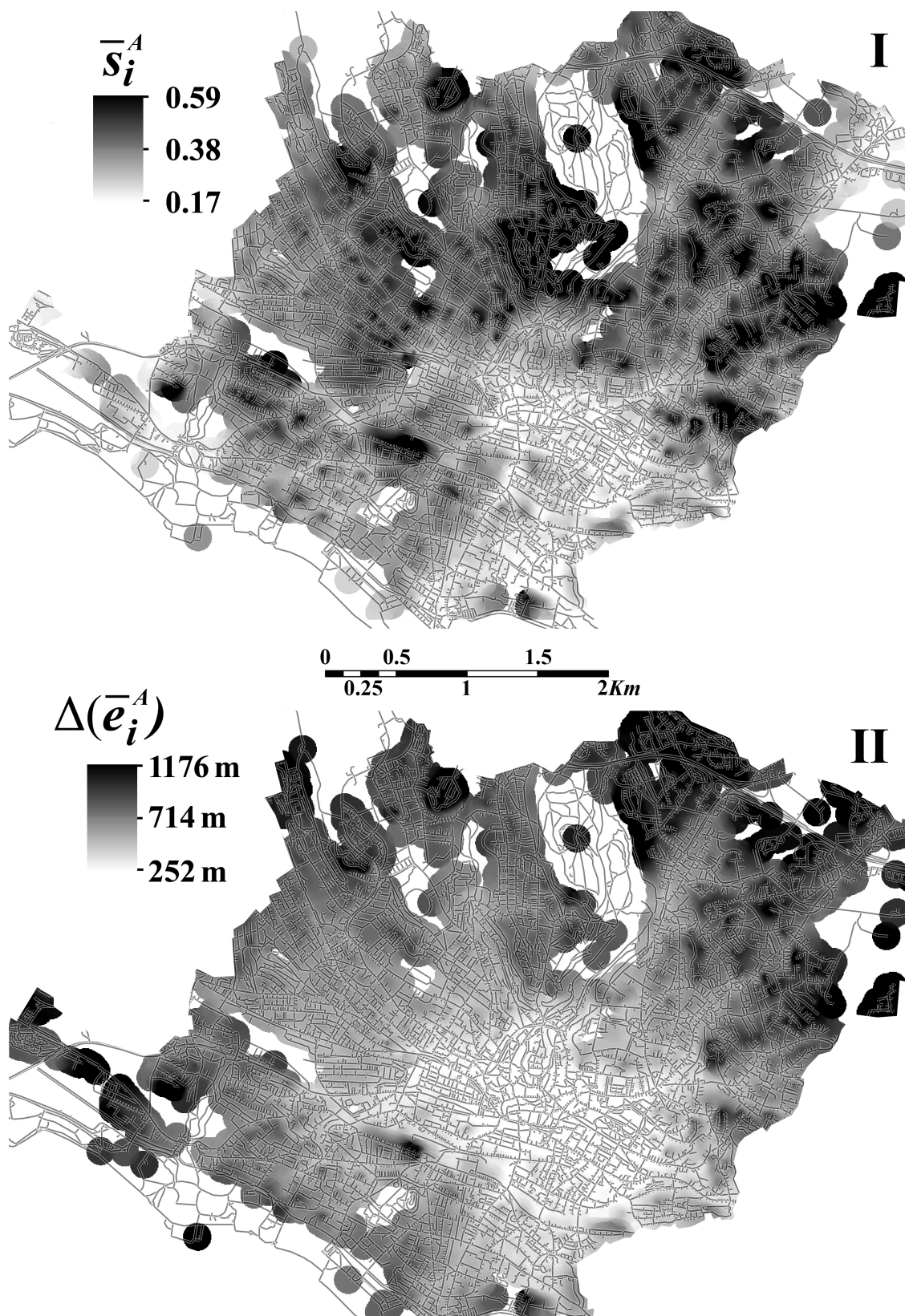


FIGURE 2.7 Empreintes de la sinuo-centralité \bar{s}_i^A (ou détour relatif moyen) (I) et du détour absolu moyen $\Delta(\bar{e}_i^A)$ (II) entre tous les bâtiments habités de la ville.

2.5 Perspectives et conclusion

Ces deux premiers chapitres ont globalement proposés différentes méthodes et indices pour évaluer le réseau piétonnier d'une ville. En basant les analyses sur les bâtiments habités, c'est plus précisément le réseau permettant leur inter-connection qui a été investigué. Bien que cela ne représente qu'environ 7'000 nœuds sur les 30'000 qui composent le réseau, la répartition spatiale des constructions habitées couvre l'ensemble du territoire. Cela laisse à penser que les résultats obtenus permettent tout de même une évaluation de l'ensemble du réseau. La prise en considération de la totalité des nœuds permettrait certes une étude plus approfondie mais elle se ferait au prix d'un coût computationnel très important (calcul de la distance entre 450 millions de paires de points). On mentionnera toutefois que cette démarche a été effectuée sur différents secteurs de la ville lors de construction du réseau afin d'en détecter d'éventuelles erreurs topologiques. Ces erreurs dont les sources sont multiples³ correspondent typiquement à une arête manquante ou déconnectée. Elles ont pour effet de réduire la connectivité et peuvent occasionner localement d'importants détours. L'indice de sinuo-centralité s'est ainsi avéré utile pour les détecter : de fortes valeurs de l'indice apparaissant dans des endroits de la ville à priori bien inter-connectés. Par ailleurs, on précisera que la "betweenness centrality" (Freeman, 1979), stipulant qu'être central c'est être entre les autres, n'a pas été calculée. Elle aurait permis de mettre en avant les nœuds ou les arêtes du réseau les plus traversés par l'ensemble des itinéraires entre toutes les paires de bâtiments. Dans la littérature les cas d'étude portant sur cette centralité sont nombreux, on citera par exemple Crucitti et al. (2006); Murphy et al. (2015); Sevtsuk & Mekonnen (2012); Travençolo & Costa (2008); Wang et al. (2011).

D'un autre point de vue, le formalisme présenté offre une approche possible pour évaluer l'accessibilité piétonne qu'à la population aux transports publics, aux écoles, aux zones de détente, aux infrastructures sportives ou à tout autre centre d'intérêt. À des fins de planification, les différents indices permettraient d'évaluer spatialement différents scénarios de raccordement d'un nouveau quartier au tissu urbain environnant immédiat ou plus lointain. Au niveau architectural, on pourrait envisager évaluer l'accessibilité qu'ont différentes parties d'un bâtiment aux sorties de secours. en termes de vécu et de perception, la temporalité de l'espace fait bien souvent plus sens que sa métrique. Le passage d'une distance à un temps de parcours présuppose la définition

3. Il s'agit principalement d'erreurs se produisant lors de la numérisation des relevés de terrain ou de l'édition du réseau. Ce dernier a été initialement conçu dans AutoCAD, il a ensuite été migré vers ArcGIS ainsi que dans une base PostgreSQL. Le passage entre ces différentes plateformes a également été à la source d'un certain nombre d'erreurs.

d'une vitesse de déplacement et amène à une inévitable complexification du modèle impliquant, par exemple, la prise en compte des pentes ou des temps d'attente pour traverser les routes. Bien que sortant du cadre de cette thèse, l'application des méthodes élaborées à des temps de parcours n'en constitue pas moins une perspective intéressante, notamment dans le cas de réseaux multimodaux alliant marche à pied et transports publics.

Pour apporter une synthèse et une conclusion visuelle, la figure commentée (2.8) expose les empreintes des principaux indices de centralité abordés dans ces deux premiers chapitres.

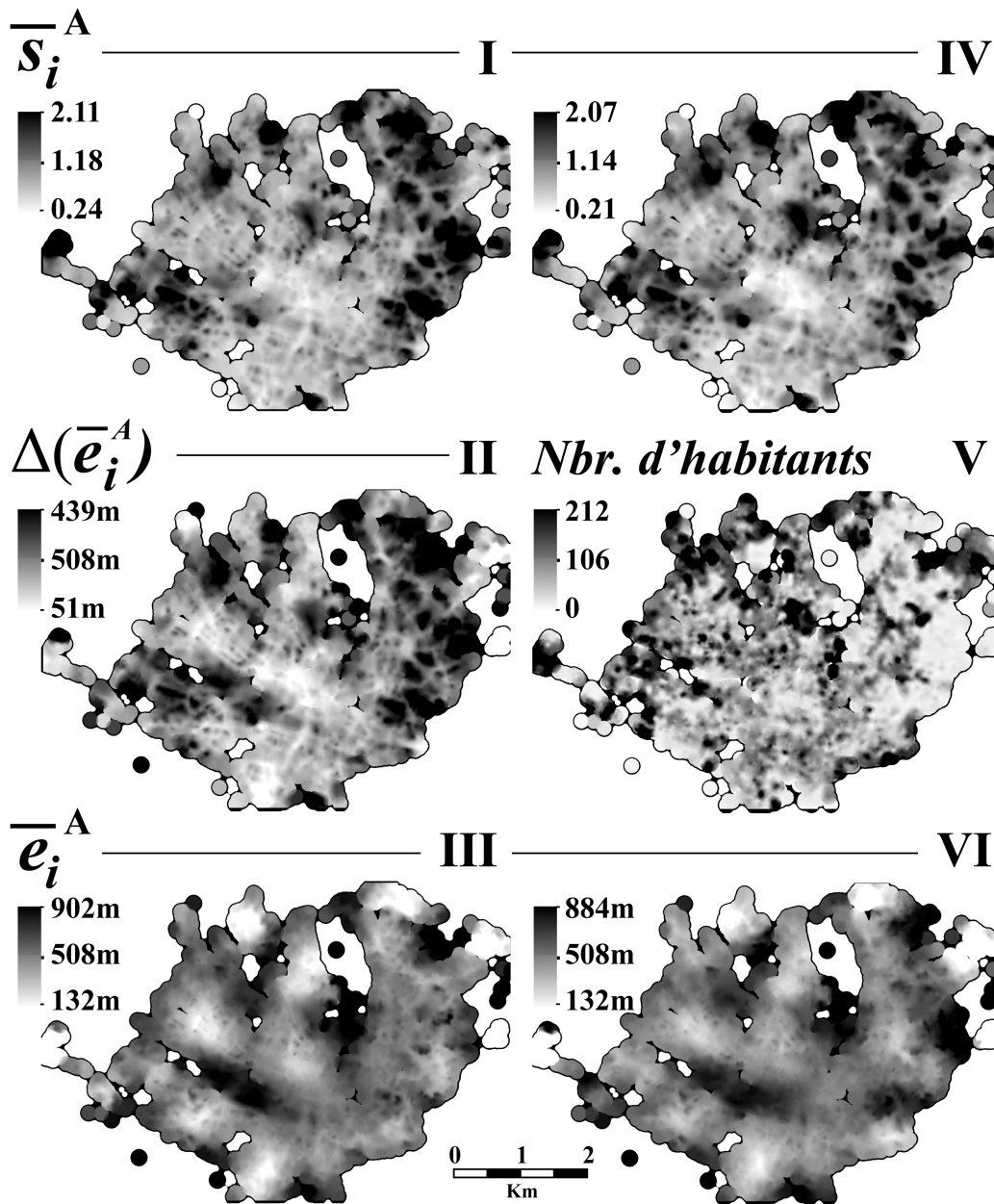


FIGURE 2.8 Empreintes de la sinuo-centralité (I, IV), de détour $\Delta(\bar{e}_i^A)$ (II) et de la centralité de proximité (III, VI) pour une distance de marche maximale $c = 1000$ m. La carte V représente la population. \bar{s}_i^A (I) permet de révéler les artères et les veines urbaines les mieux connectées du réseau piétonnier. La prise en compte de la population (IV) apporte principalement des changements dans l'Est où les variations démographiques sont particulièrement marquées (V). Le cœur de la ville tend également à s'éclaircir au vu de sa faible population résidente. Les zones foncées indiquent les parties de la ville où des itinéraires de moins d'un 1km se font en moyenne au travers de cheminements plus sinueux que dans les zones claires. Le détour $\Delta(\bar{e}_i^A)$ mesure le détour moyen induit par le fait que les bâtiments ne sont pas interconnectés en ligne droite. Le jeu de contrastes entre centricité (III, blanc) et excentricité (noir) met en avant des noyaux de proximité répartis sur l'ensemble du territoire. Plus la zone est foncée, plus les bâtiments qui s'y trouvent ont une distance moyenne aux autres bâtiments élevée. Dans VI, cet isolement est d'autant plus important que les autres bâtiments sont peuplés. À l'inverse les valeurs faibles témoignent d'une bonne proximité entre les bâtiments et peuvent en ce sens être considérées comme les zones de la ville les plus accessibles.

Chapitre 3

Transport optimal régularisé

L'évolution spatiale, démographique et politique d'une ville nécessite une réadaptation permanente de la part des services publics. Le service des écoles a par exemple été appelé à redéfinir les bassins de recrutement scolaires (ou établissements) d'une part parce que certains étaient devenus trop peuplés pour une gestion efficace, et d'autre part parce qu'ils ne correspondaient plus à l'accord intercantonal sur l'harmonisation scolaire de la scolarité obligatoire (Harmos, accepté en 2009). Ces quelques éléments seront abordés dans le chapitre suivant consacré aux champs d'application de l'algorithme dont le formalisme, les différentes fonctionnalités ainsi que les aspects computationnels sont discutés dans le présent chapitre.

Les modèles d'organisation ou de planification scolaire visant notamment à assigner les élèves aux écoles d'une ville ou d'une région sont développés depuis les années 60. Caro et al. (2004) propose un aperçu de 18 modèles élaborés avant l'an 2000, alors que les plus récents ont été notamment discutés par (Ivan Castillo-Lopez, 2015). L'idée sous-jacente à l'ensemble de ces modèles est d'attribuer des entités géographiques (un bâtiment ou des ensembles de bâtiments -“city-block”-) aux infrastructures scolaires tout en minimisant le coût global de l'opération. Différentes contraintes peuvent être prises en compte, elles peuvent être spatiales (distance maximale de parcours, obstacles naturels ou anthropiques), logistiques (capacité d'accueil des écoles, modulable ou non), économique (budget limité), ou encore sociales (taux de mixité ethnique). Ces contraintes ont pour but de produire des schémas d'assignation ou de gestion politiquement acceptables et les plus réalistes possibles. Elles sont de ce fait intimement liées au cas d'étude auquel elles s'adressent et bien souvent un modèle intègre plusieurs contraintes, comme en témoignent les travaux d'Antunes et al. (2009; 2000; 2001; 2003) ou plus récemment les recherches de Delmelle et al. (2014) et Amaya et al. (2015).

La proximité domicile-école, ou “closest assignment”, est une dimension importante de l’organisation scolaire lausannoise, particulièrement pour les plus jeunes élèves. Le modèle proposé ici permet de répartir les élèves dans les différentes écoles en minimisant la distance totale des trajets domicile-école, tout en tenant compte de leur capacité d’accueil. Cela représente une instance classique du problème du transport optimal largement discuté et développé dans la littérature (Ahuja et al., 1993; Kantorovich, 1942; Monge, 1781; Villani, 2008).

3.1 Formalisme

Le problème du transport optimal impliquant n origines et m destinations vise à minimiser le coût de transport $U(P)$

$$\min_{P \in \mathcal{P}} U(P) \quad U(p) = \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^m p_{ig} d_{ig} \quad (3.1)$$

où \mathcal{P} est l’ensemble des schémas d’attributions possibles $P = (p_{ig})$ satisfaisant les contraintes en marges

$$p_{ig} \geq 0, \quad p_{\bullet\bullet} = 1, \quad p_{i\bullet} := \sum_{g=1}^m p_{ig} = f_i \quad \text{et} \quad p_{\bullet g} := \sum_{i=1}^n p_{ig} = \rho_g \quad (3.2)$$

p_{ig} représente la proportion relative d’élèves en i attribuée à l’école g , et $d_{ig} \geq 0$ la distance à pied entre le domicile et l’école. On a $f_i, \rho_g > 0$ et il y a équilibre entre la proportion totale d’élèves et la capacité relative d’accueil totale des écoles : $\sum_i f_i = \sum_g \rho_g = 1$.

Tout schéma d’attribution $P = (p_{ig})$ de dimension $n \times m$ ayant pour marges fixes les origines f et les destinations g constitue une distribution bi-variée qui définit une matrice d’appartenance $Z = (z_{ig})$, avec $z_{ig} := p_{ig}/f_i \geq 0$ et $z_{i\bullet} = 1$, $\sum_i f_i z_{ig} = \rho_g$.

La probabilité d’appartenance z_{ig} d’une origine i à une destination j définit une classification ou un partitionnement (“clustering”) de n objets en m groupes. Le partitionnement est dit dur (“hard” ou “crisp”) si $z_{ig} = 0, 1$, et flou (“soft” ou “fuzzy”) sinon. Dans un contexte scolaire, un schéma d’attribution présuppose des valeurs entières, c’est-à-dire qu’il n’est en pratique pas possible d’attribuer par exemple 2.5 élèves à une école. Cela étant, rien n’empêche le présent formalisme à générer de telles propositions. Pour y répondre, on attribuera l’ensemble des élèves habitant en i à l’école dont la probabilité d’appartenance est la plus grande, i.e. on définira la matrice des

appartenances durcies par

$$z_{ig}^* := \begin{cases} 1 & \text{si } z_{ig} = \max_h z_{ih} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Envoyer les élèves d'un même immeuble dans la même école est une position tout à fait tenable autant du point de vue de l'organisation scolaire que parental, et tend à une certaine équité spatiale. Conceptuellement z_{ig}^* opère un durcissement du partitionnement flou et peut amener au fait que les contraintes de capacité ne sont pas tout à fait respectées. Comme expliqué par la suite, le paramétrage de l'algorithme permet toutefois de limiter ces erreurs amenant de manière générale à une sur- ou sous-capacité des écoles bien souvent inférieures à +/- 10 élèves; des quantités négligeables au vu du nombre d'élèves traités (entre ~1000 et ~7000 individus selon le ou les niveaux scolaires considérés). On mentionnera par ailleurs que pour un immeuble i donné, la deuxième plus haute probabilité d'appartenance z_{ig} peut être utilisée pour attribuer un deuxième choix d'école aux élèves qui y habitent. On notera que l'algorithme du simplexe (Ahuja et al., 1993; Winston & Goldberg, 2004) permet d'obtenir des schémas d'attribution à valeurs entières et peut être utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire (LP), tel que celui du transport optimal. Son utilisation peut amener à une ou plusieurs solutions optimales et son exécution sur de larges jeux de données peut s'avérer très lente.

3.1.1 Régularisation et entropie

Le mécanisme de régularisation consiste à perturber l'objectif à minimiser $U(P)$ en y ajoutant une fonctionnelle convexe. Cela revient à considérer le problème

$$\min_{P \in \mathcal{P}} F(P) \quad F(P) := U(P) + T \cdot I(P) \quad I(P) \text{ convexe} \quad T > 0 \quad (3.4)$$

$F(P)$ (3.4) est l'énergie libre, constituée de l'énergie $U(P)$ et de l'information mutuelle $I(P)$ entre les origines O et les destinations G définie comme :

$$I(P) := \sum_{ig} p_{ig} \ln \frac{p_{ig}}{f_i \rho_g} = \sum_{ig} f_i z_{ig} \ln \frac{z_{ig}}{\rho_g} = H(O) + H(G) - H(O, G) \quad (3.5)$$

où $H(\cdot)$ représente l'entropie.

Par construction (Cover & Thomas, 2012), $I(P) \geq 0$, avec $I(P) = 0$ ssi $p_{ig} = f_i \rho_g$ (indépendance).

L'ajout de $I(P)$ rend $F(P)$ convexe. Le minimum de $F(P)$ sur l'espace convexe $P \in \mathcal{P}$ est ainsi unique et définit la solution optimale régularisée. La température T est un paramètre libre apportant une certaine souplesse dans l'attribution de O à G . Lorsque $T \rightarrow 0^+$ on minimise $U(P)$. La probabilité d'appartenance z_{ig} tend à être dure pour la plupart des i , mais il reste toujours des points pour lesquels z_{ig} demeure flou (fig. 3.7, IV et VI).

À l'autre extrême, lorsque $T \rightarrow \infty$ on minimise $I(P)$, les associations origine-destination doivent disparaître et cela a pour conséquence de rendre l'assignement indépendant $p_{ig}^\infty = f_i \rho_g$. Augmenter la température engendre un partitionnement plus flou où les élèves d'une même habitation tendent à être envoyés vers plusieurs écoles. L'incertitude d'attribution d'une origine i aux différentes écoles g peut être mesurée par l'entropie conditionnelle $H(G|i) := -\sum_g z_{ig} \ln z_{ig} \geq 0$. L'entropie conditionnelle moyenne $H(G|O) = \sum_i f_i H(G|i)$ est une mesure d'incertitude globale du schéma d'attribution. Elle indique la souplesse ("softness" ou "fuzzyness") du partitionnement et elle est liée à l'information mutuelle comme $I(P) = H(G) + H(O) - H(G, O) = H(G) - H(G|O) \geq 0$. Pour un même jeu de données l'accroissement de la température engendre des valeurs de plus en plus élevées de $H(G|i)$ et de $H(G|O)$. On notera que le choix (3.5) porté sur l'information mutuelle de $I(P)$ est motivé par le rôle qu'elle joue dans les approches de clustering et correspond en l'occurrence à l'algorithme du soft k-means (Bavaud, 2009) illustré à la sous-section 3.4.

3.1.2 Multiplicateurs de Lagrange

Minimiser $F(P)$ dans (équ. 3.4) sous les contraintes (équ. 3.2) revient à

$$p_{ig}(T) = f_i \rho_g e^{-\beta(d_{ig} - u_i - v_g)} = f_i b_i \rho_g \mu_g e^{-\beta d_{ig}} \quad (3.6)$$

où $\beta := 1/T$ est l'inverse de la température. Les facteurs de dilatation $b_i = \exp(\beta u_i)$ et $\mu_g = \exp(\beta v_g)$ sont définis à une constante multiplicatrice près : $b_i \rightarrow c b_i$ et $\mu_g \rightarrow \mu_g / c$. Ils sont associés aux multiplicateurs de Lagrange u_i et v_g satisfaisant les contraintes en marge. Ces dernières impliquent

$$b_i = \frac{1}{\sum_h \rho_h \mu_h e^{-\beta d_{ih}}} \quad \frac{1}{\mu_g} = \sum_i \frac{f_i e^{-\beta d_{ig}}}{\sum_h \rho_h \mu_h e^{-\beta d_{ih}}} . \quad (3.7)$$

L'expression (équ.3.6) est identique au modèle gravitaire doublement contraint (Wil-

son (1969), Fotheringham & O’Kelly (1989), Erlander & Stewart (1990)) utilisé dans la modélisation de flux spatiaux. La limite $T = 1/\beta \rightarrow 0^+$ approche la solution froide régularisée P^0 , satisfaisant en particulier (éq.3.6)

$$p_{ig}^0 > 0 \quad \Leftrightarrow \quad d_{ig} = u_i + v_g \qquad p_{ig}^0 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad d_{ig} > u_i + v_g . \quad (3.8)$$

u_i est à interpréter comme le prix d’embarquement à payer pour ramasser les élèves en i , alors que v_g est le prix de débarquement pour les déposer à l’école g . Tous deux sont définis à une constante près $u_i \rightarrow u_i + c$, $v_g \rightarrow v_g - c$. Le coût optimal est la somme moyenne des coûts d’embarquement et de débarquement, un résultat connu sous le nom de “dualité de Kantorovich” :

$$U(P^0) = \sum_{ig} p_{ig}^0 (u_i + v_g) = \sum_i f_i u_i + \sum_g \rho_g v_g = \max_{x,y \mid x_i + y_g \leq d_{ig}} \left(\sum_i f_i x_i + \sum_g \rho_g y_g \right) . \quad (3.9)$$

La seconde identité de (3.7) correspond à un schéma itératif EM $\mu^{(t+1)} = f(\mu^{(t)})$ convergeant vers un minimum global de $F(P)$.

3.2 Illustrations sur une grille

La figure 3.1 apporte une visualisation des éléments mentionnés jusqu'à présent sur un réseau artificiel en grille fait de 576 noeuds représentant les origines (élèves). Elle propose une illustration de l'évolution de l'entropie $H(G|i)$ en fonction de la température T , du plus chaud ($\beta = 0.001$) au plus froid ($\beta = 0.05$), pour trois jeux de données (I-III) "théoriques" différents. Le but est d'attribuer les habitations contenant un élève (petits cercles) aux écoles (grands cercles noirs). Ces dernières sont au nombre de 6 pour les cas I et III, et sont 8 dans le cas II. Elles ont des capacités de 96 places pour les cas I et III et 72 places pour le cas II.

Avec β faible l'incertitude d'attribution $H(G|i)$ est forte (en foncé) pour la plupart des élèves. La baisse progressive de la température (augmentation de β) a pour effet de faire apparaître des frontières de plus en plus nettes entre les groupes. Ce phénomène est particulièrement visible dans le cas I. Les élèves situés sur ces frontières sont les plus susceptibles d'être attribués à deux ou plusieurs écoles. En termes de gestion ce sont les candidats idéaux à utiliser pour équilibrer, au besoin, les effectifs d'une ou de plusieurs écoles (remplissage ou désengorgement de classes).

La répartition des écoles sur la grille a un impact direct sur $H(G|i)$ comme l'illustre le cas III où 4 écoles sont relativement proches les unes des autres. Ce regroupement fait que de nombreux élèves sont situés à quasi équidistance des écoles, les attribuer à l'une ou l'autre est ainsi un choix délicat : l'incertitude d'attribution associée est ainsi forte. Spatialement cela se traduit non plus par la présence de frontières fines mais par des zones de haute entropie. Au-delà de la configuration spatiale des écoles, leur nombre a également une influence sur $H(G|i)$ dans la mesure où un plus grand nombre d'écoles augmente les possibilités d'attributions et le nombre de frontières.

Le cas II propose un partitionnement sur la base de 8 écoles réparties sur les bords de la grille. Dans la partie haute les écoles sont bien espacées et les frontières associées sont donc bien délimitées ($\beta = 0.001$, II). A contrario dans la partie inférieure gauche la proximité de trois bâtiments scolaires génère dans cette région une zone à forte entropie d'attribution. Passer d'un partitionnement flou (z_{ig}) à dur (z_{ig}^* , 5^{ème} ligne) est nécessaire pour obtenir un schéma d'attribution à valeurs entières, mais peut induire une violation de la contrainte de capacité (sous- et sur-capacité des écoles) (histogrammes, 6^{ème} ligne). Ces erreurs tendent à se produire lorsque le durcissement est réalisé alors que de nombreuses valeurs fortes de $H(G|i)$ subsistent. Ce phénomène est bien visible dans le cas I pour lequel la contrainte de capacité est plutôt bien respectée. À l'inverse les cas II et III présentent encore à $\beta = 0.001$ de nombreux points à haute entropie, cela peut induire un déséquilibre entre la capacité des écoles

et les effectifs attribués par le modèle. Afin de se prémunir au mieux de ce type d'erreur, il convient ainsi de traiter tout jeu de données avec la température la plus basse possible avant de procéder au durcissement de z_{ig} .

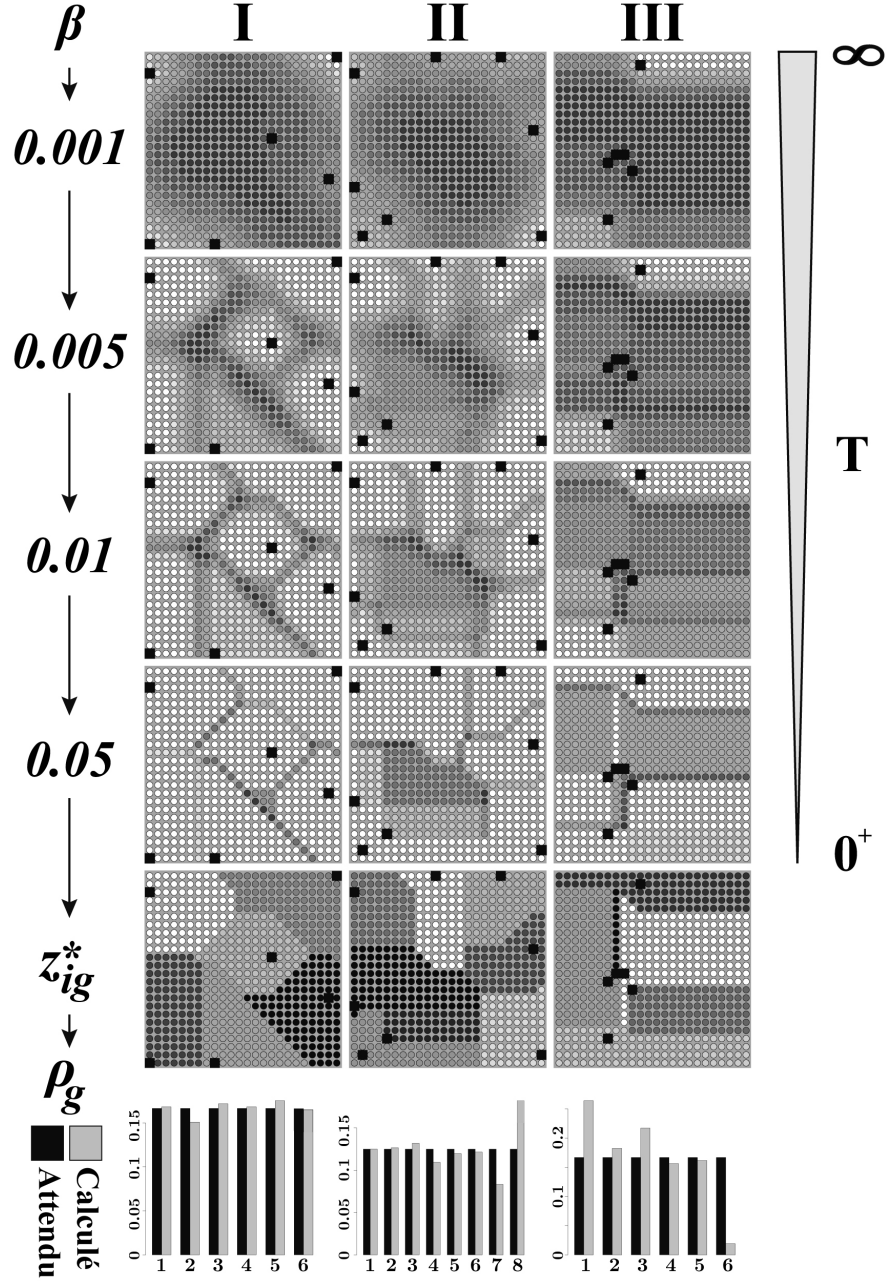


FIGURE 3.1 Évolution de l'entropie $H(G|i)$ en fonction de la température T , du plus chaud (1^{ère} ligne) au plus froid (4^{ème} ligne). Histogramme des appartenances durcies z_{ig}^* (5^{ème} ligne), associées à la température la plus froide ($\beta = 0.05$), comparant les capacités relatives des écoles (ρ_g) (en noir) avec la proportion d'élèves attribuée par le modèle (en gris).

3.3 Notes computationnelles

Cette dernière sous-section synthétise les différentes fonctionnalités de l'algorithme et discute quelques aspects computationnels inhérents à son exécution. Les différentes figures sont basées sur un jeu de données contenant 1'079 élèves de 5^{ème} année primaire habitant dans 874 immeubles. Les écoles pouvant les accueillir sont au nombre de 25 et leur capacité varie entre 20 et 86 places.

Tout schéma itératif nécessite d'être arrêté à un moment ou à un autre pour aboutir à une solution. Le nombre d'itérations ainsi qu'une faible température ont pour effet de rallonger les temps de calcul. La température ne peut pas être abaissée indéfiniment, il arrive un moment où le dénominateur de l'équation (3.7) devient nul et l'algorithme « plante ». Le critère de convergence consiste à vérifier que les valeurs de μ_g à l'itération t sont égales à celles obtenues à l'itération précédente de la forme

$$\mu_g^{(t)} = f(\mu_g^{(t-1)}) \quad (3.10)$$

Il n'est pas rare que le nombre d'itérations nécessaires pour parvenir à cette égalité soit conséquent, et ce particulièrement à basse température. Lorsqu'elle est vérifiée, cela indique que la solution optimale a été trouvée. Le processus itératif peut également être stoppé après un nombre maximal d'itérations défini à l'avance. Avec le jeu de données proposé, le critère de convergence est satisfait après ~18'000 itér. avec ($\beta = 0.05$) et ~74'000 itér. avec $\beta = 0.12$, alors qu'avec $\beta = 0.2$ il n'est toujours pas satisfait après 300'000 itérations.

La figure suivante (fig.3.2) illustre l'évolution de μ_g de deux écoles (I à IV et V à VIII) durant le processus itératif avec deux températures différentes. Lors des premières itérations, le tracé est marqué d'oscillations plus ou moins creusées (I,III,V,VII) puis tend à se stabiliser comme en témoignent les graphiques II, IV, VI et VIII. À partir d'un certain moment les valeurs de chaque μ_g deviennent strictement croissantes ou décroissantes ($\rightarrow 0^+$). Quand toutes les valeurs deviennent stationnaires, le critère de convergence $\mu^{(\infty)} = f(\mu^{(\infty)})$ est satisfait. Le but étant d'obtenir un schéma d'attribution à valeurs entières z_{ig}^* , on observera de manière analogue le comportement de la fonction indicatrice $I(Z^{*(t)} = Z^{*(t-1)})$ durant le processus itératif., tel que

$$I(A) := \begin{cases} 1 & \text{si l'événement } A \text{ est vrai} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

Comme illustré dans la figure 3.3, il arrive un moment à partir duquel cette égalité reste vraie, c'est-à-dire que le partitionnement durci ne change plus, le processus

itératif peut donc être interrompu. Expérimentalement et pour tous les jeux de données traités, ce moment se situe avant 20'000 itérations.

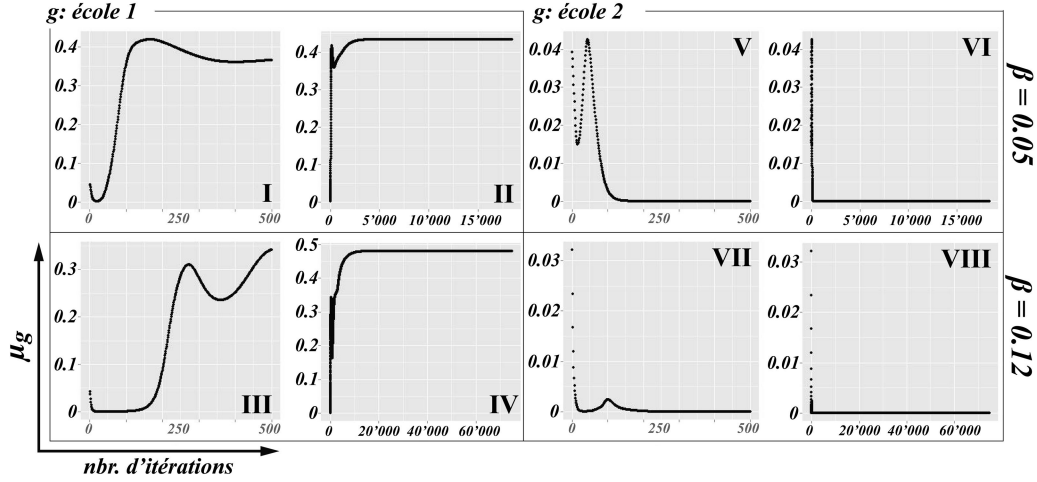


FIGURE 3.2 Illustrations de μ_g de deux écoles durant le processus itératif pour des températures différentes et pour un même jeu de données. Lors de la phase d'initialisation le tracé est marqué d'oscillations plus ou moins creusées (I, III, V, VII) puis tend à se stabiliser comme en témoignent les graphiques II, IV, VI et VIII. Une faible valeur de μ_g dénote une école g trop loin ou trop petite pour accueillir l'ensemble des plus proches élèves.

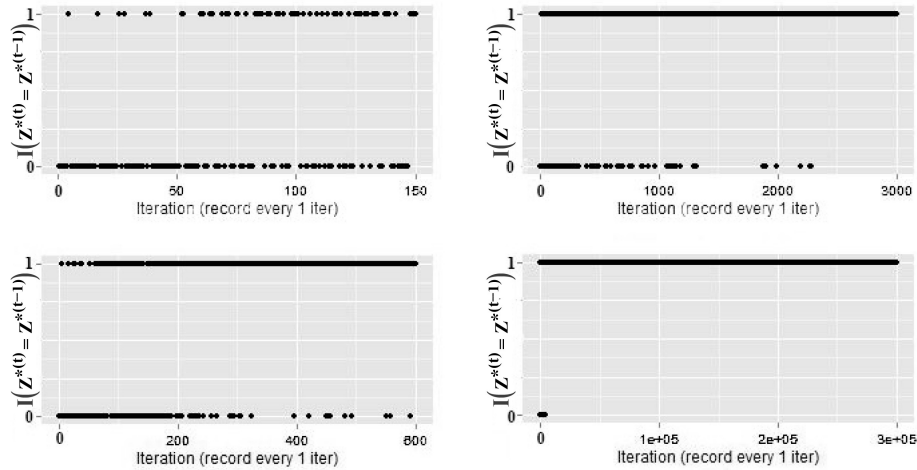


FIGURE 3.3 Illustrations de $I(Z^*(t) = Z^*(t-1))$ au travers d'intervalles de 150, 600, 5000 et 300'000 itérations. À chaque itération, on observe si la matrice des appartenances durcies est égale ($I = 1$) ou non ($I = 0$) à celle de l'itération précédente. On remarque qu'après un certain nombre d'itérations les appartenances durcies ne changent plus, poursuivre le processus itératif est donc superflu.

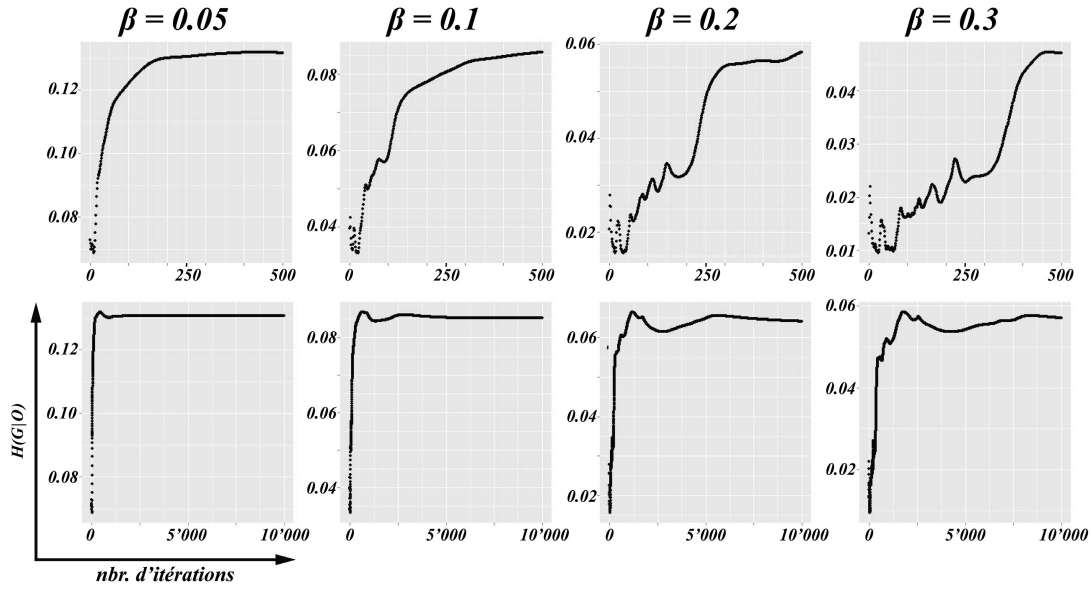


FIGURE 3.4 Évolution de l'entropie $H(G|O)$ durant le processus itératif pour des températures différentes (du plus chaud $\beta = 0.05$ au plus froid $\beta = 0.3$). Les graphiques de la ligne du haut représentent la phase initiale (500 premières itérations) et celles du bas offrent une fenêtre plus large (10'000 itér.). Globalement (ligne du bas) l'entropie associée à une haute température (β faible) est plus élevée, et sa croissance plus rapide qu'avec une température plus basse. L'abaissement de la température engendre des variations de $H(G|O)$ de plus en plus marquées.

Techniquement les données scolaires sont préparées et les distances domicile-écoles sont calculées dans ArcGIS. Elles sont ensuite importées dans R (via shapefiles) où l'algorithme de transport optimal régularisé est exécuté. Les résultats sont cartographiés directement dans R afin de pouvoir les évaluer et, au besoin, relancer les analyses avec d'autres paramètres (β , nombre d'itérations, modulation de la capacité des écoles). Les figures 3.5 et 3.6 exposent les résultats bruts produits dans R qui permettent de synthétiser les différentes fonctionnalités de l'algorithme.

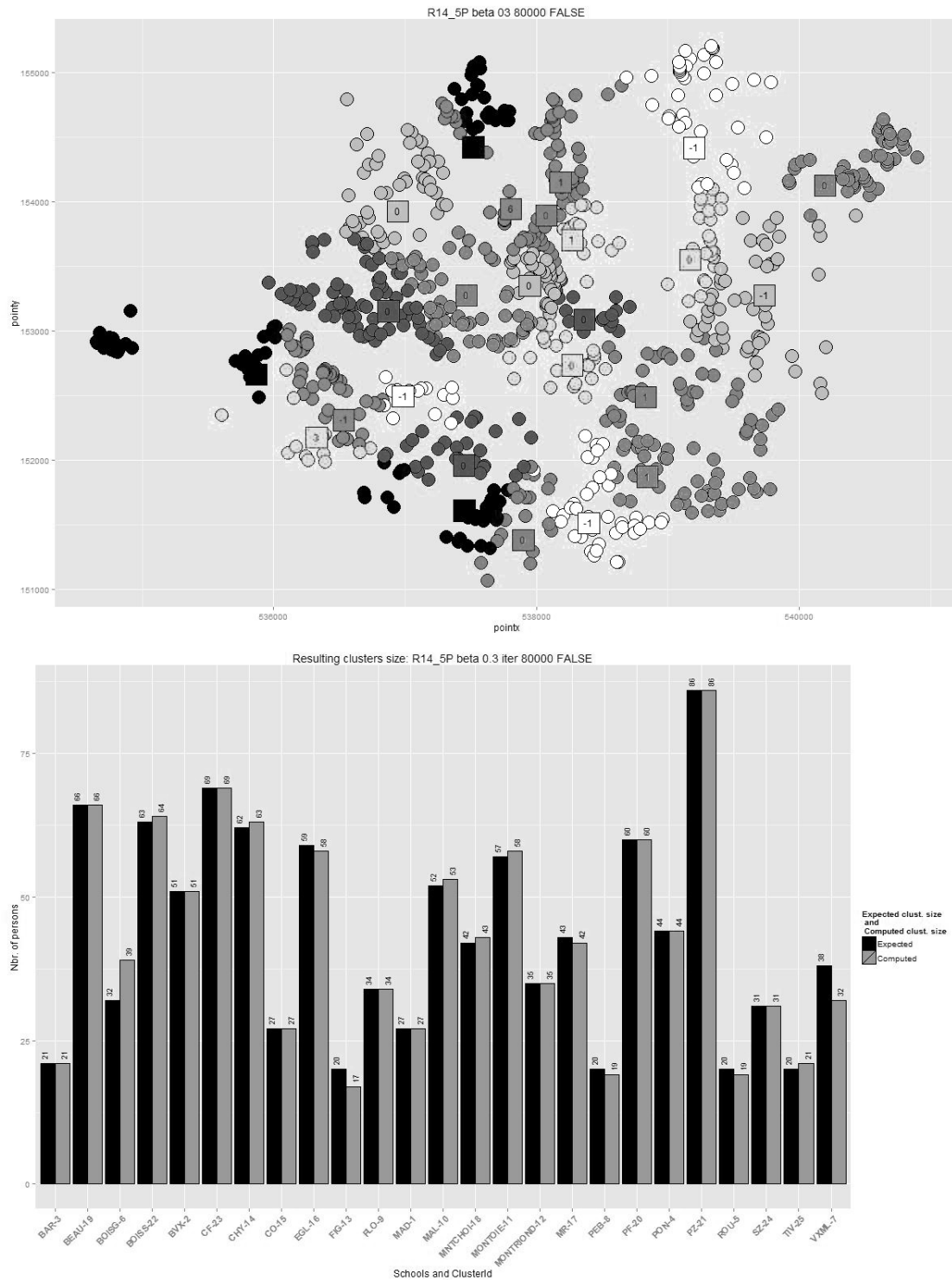


FIGURE 3.5 La carte du haut illustre l'attribution des immeubles habités par des élèves (cercle) aux différentes écoles (carré). Le pattern obtenu permet d'observer la zone d'affluence, ou la zone de recrutement de chaque bâtiment scolaire. L'histogramme permet de comparer la capacité de chaque école avec le nombre d'élèves attribués par l'algorithme. En l'occurrence, la contrainte de capacité est ici plutôt bien respectée. On notera qu'un rééquilibrage manuel est des fois nécessaires et revient généralement à changer l'attribution de quelques immeubles. Ces changements de groupes se font de préférence en observant l'entropie d'attribution $H(G|i)$ (fig. 3.6).

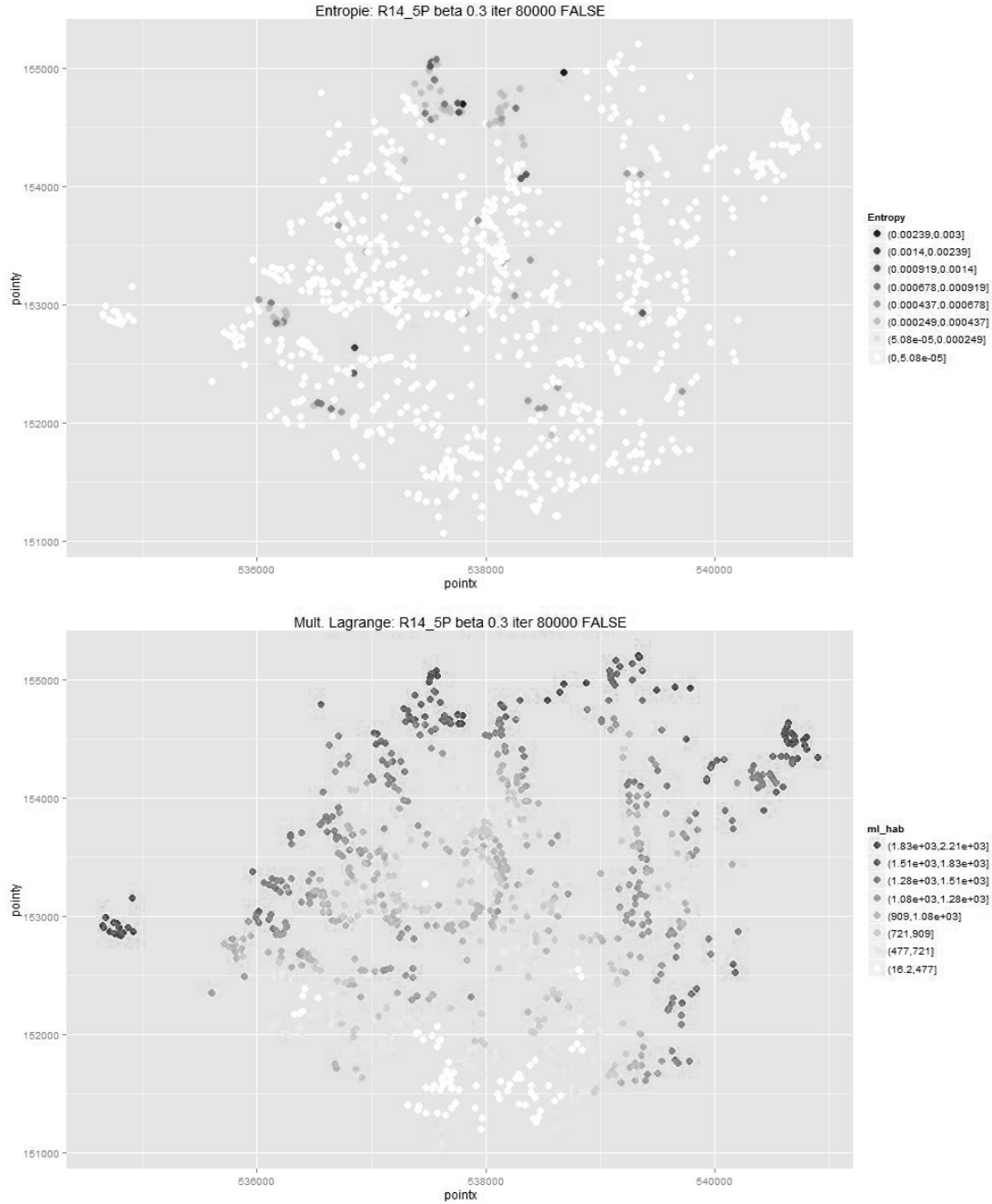


FIGURE 3.6 Les fortes valeurs de $H(G|i)$ (haut) permettent d'identifier les bâtiments les plus à même d'être assignés à une autre école. Les multiplicateurs de Lagrange u_i associés aux élèves (bas) offrent une visualisation du coût de transport piétonnier des élèves (les multiplicateurs v_g associés aux écoles seront illustrés ultérieurement à la fig. 5.10). Basé sur la distance domicile-école, ce coût est spatial. Il est élevé lorsque la distance domicile-école est grande. Pour un immeuble donné, cette éloignement peut résulter du fait qu'il n'y a tout simplement pas d'école à proximité, mais peut également être dû au fait que la ou les écoles proches sont pleines. Dans le cas présent, la cartographie de u_i révèle un net gradient Nord-Sud indiquant que la configuration spatiale et la capacité des écoles engendrent une meilleure proximité domicile-école dans le Sud que dans le Nord ou que dans les quartiers périphériques à haute densité.

3.4 Transport optimal non-contraint (k-médoïdes)

On achèvera ce chapitre et la première partie de cette thèse avec un brin de nostalgie, en exposant les premiers résultats obtenus lors du développement de l'algorithme. De manière analogue au k-means, l'algorithme peut être utilisé pour partitionner un ensemble de n points en m groupes, sans contrainte de capacité ni connaissance préalable de la position des m destinations (écoles). La méthode des k-médoïdes consiste à considérer l'ensemble des n nœuds du réseau comme possibles destinations (ou centroïdes) et repose généralement sur les distances du plus court chemin (l'utilisation de la distance euclidienne est toutefois possible). Le k-means quant à lui est basé sur la distance euclidienne et les centroïdes des groupes peuvent potentiellement être incarnées par n'importe quel point de l'espace et ne correspondent ainsi pas forcément à l'un ou l'autre des n points. Les deux approches nécessitent des matrices de distances $n \times n$ beaucoup plus lourdes à générer et à traiter que lorsque la localisation des destinations est connue et fixe ($n \times m$) comme exposé jusqu'à présent. La figure 3.7 (p.63) propose un partitionnement flou ("fuzzy k-medoid") (z_{ig}^* , I-IV) et durci (z_{ig}^* , V) en quatre parties des 4'392 bâtiments du Nord-Ouest de la ville. La comparaison de IV et de VI illustre l'effet de la température sur les probabilités d'appartenance. Comme pour le k-means, les résultats obtenus dépendent fortement du positionnement initial des points de départ ("seeds") choisi, il ne s'agit donc que d'une solution parmi d'autres.

3.5 Perspectives et conclusion

L'algorithme a été testé sur de nombreux jeux de données scolaires. Les temps de calcul varient de toute évidence en fonction de la situation initiale (nombre d'écoles et nombre d'immeubles à attribuer). Le plus gros jeu de données contient 44 écoles et 2'887 bâtiments dans lesquels habitent un peu plus de 7'000 élèves. Le temps de calcul associé est d'environ 2h pour 20'000 itérations alors que pour d'autres données (40 écoles, 1055 immeubles, 1323 él.) cela prend une quinzaine de minutes¹. Le durcissement du partitionnement flou peut amener à de légères erreurs sur les effectifs attribués aux écoles, mais elles demeurent marginales au vu du nombre d'élèves traités. À titre de perspectives l'algorithme pourrait être appliqué pour traiter des temps de parcours calculés sur la base d'un réseau multimodal. Dans le prolongement du

1. Ordinateur : processeur Intel i7 2700k 4.8ghz, 16GB RAM à 2400Mhz.

formalisme présenté dans ce chapitre, on citera les travaux de Guex et al. (2016) dont l'approche permet en plus de générer les flux origine-destination au travers du réseau. Techniquement, les distances du plus court chemin sont générées à partir de la matrice d'adjacence du réseau, aucun calcul préalable des distances origine-destination n'est donc requis.

Dans le cadre de la gestion et de la planification scolaire, l'algorithme a permis d'aider à la construction de nouveaux établissements scolaires, de réaliser des simulations d'enclassement des futurs élèves ou encore d'évaluer le schéma d'attribution réel. Ces différentes études et projets, ainsi que d'autres, sont exposés et discutés dans la seconde partie de cette thèse intitulée "Projets SIG dans le cadre de l'organisation et de la gestion scolaire".

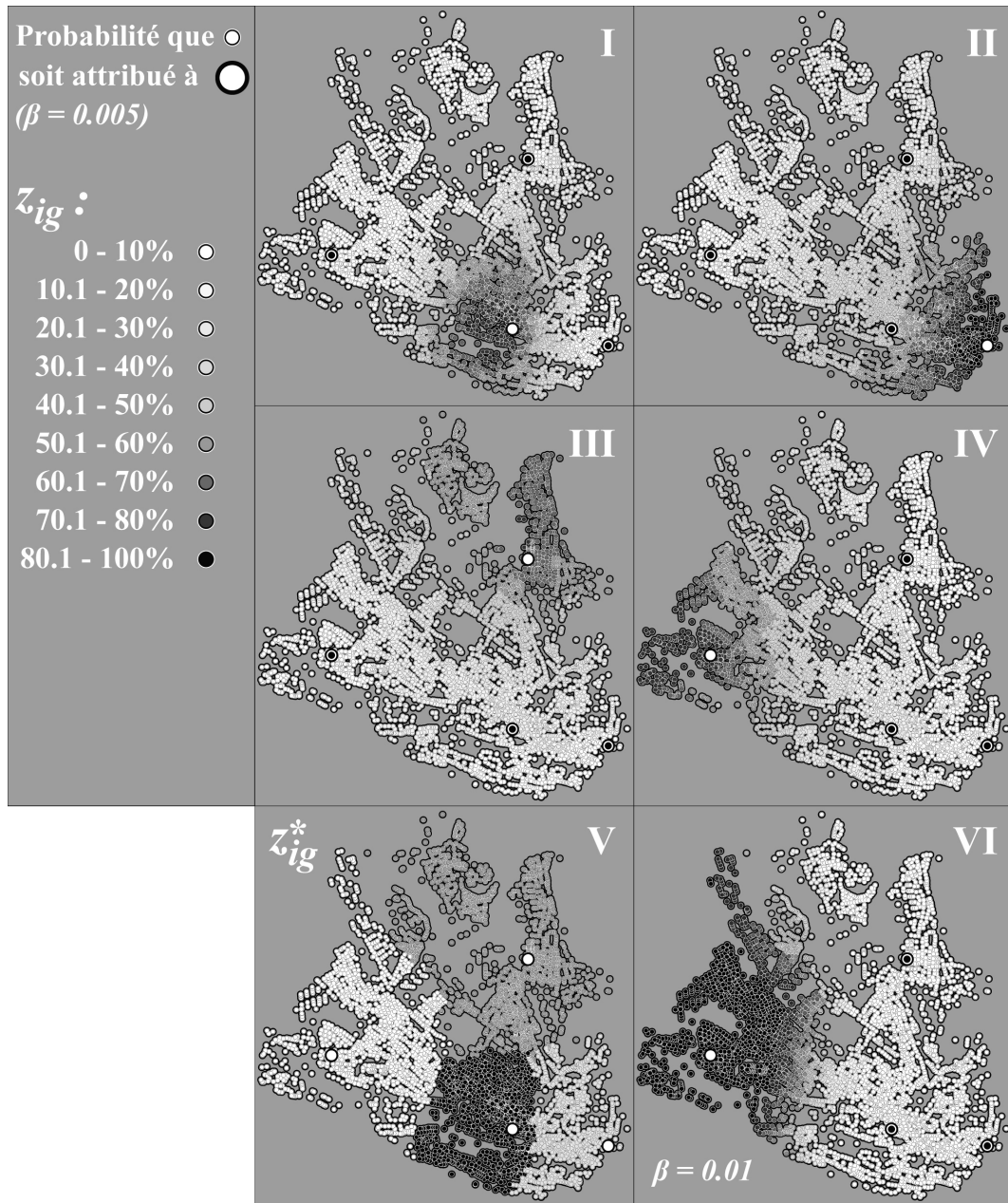


FIGURE 3.7 Partitionnement flou du Nord-Ouest de la ville en quatre parties. I-IV : z_{ig} , V : z_{ig}^* , VI : z_{ig} de IV mais avec $\beta = 0.01$. L'abaissement de la température (IV et VI) engendre une augmentation du nombre de points à forte valeur de z_{ig} .

Seconde partie

Projets SIG dans le cadre de
l'organisation et de la gestion
scolaire

Introduction

La seconde partie de cette thèse est dédiée à l'application de certaines des méthodes exposées précédemment. Elle propose différentes études et projets SIG réalisés en collaboration avec le Service des écoles primaires et secondaires (SEPS) de Lausanne. Le géoréférencement des données scolaires et la création du réseau piétonnier (2007-2008) ont ouvert la dimension scolaire d'une ville à tout le champ de l'analyse spatiale. Les travaux qui en ont résulté témoignent d'une grande diversité et concernent autant les dimensions de l'organisation générale, de la gestion courante que de la planification scolaire. Les projets présentés ont des temporalités de réalisation allant de plusieurs années à quelques heures, et des finalités pouvant impliquer ces trois dimensions. Les thématiques abordées portent sur les transports scolaires, les établissements scolaires (ou "carte scolaire"), la modélisation des flux théoriques d'élèves, ou encore la planification territoriale d'une future construction scolaire.

Descriptif des projets

Les projets sont présentés selon la chronologie de leur réalisation. Plus en détails, le premier (2007-2010) développe la mise en place d'un système gestion permettant d'attribuer des subventions pour les transports publics aux écoliers et aux jeunes lausannois de moins de 20 ans (chap. 4, p.75). Cette démarche fait suite à une demande de la sphère politique municipale souhaitant mettre en avant l'usage des transports publics faciliter la mobilité des enfants, adolescents et jeunes adultes. Le concept, novateur à l'époque, a été d'utiliser le réseau piétonnier pour créer des polygones de subvention autour des écoles. Le système est encore actuellement en service et a été opérationnel pour la première fois à la rentrée 2010.

Le succès de ce projet et la construction des géodonnées qu'il a engendrée ont amené le SEPS à nous mandater pour redéfinir les limites des établissements primaires (2012-2015) (chap.5, p.84). Cette demande était d'une part la conséquence d'une refonte de la loi scolaire (LEO), et d'autre part, la conséquence de la croissance démographique de

la jeune population de la ville. L'algorithme de transport optimal régularisé, développé dans le cadre de ce projet, a joué un rôle majeur dans ce long processus de redéfinition de la nouvelle carte scolaire (entrée en vigueur en août 2015).

Les deux derniers chapitres relatent des études de moindre envergure. Le troisième projet (2013) exposé (chap. 6, p.109) fait suite à une demande interne du SEPS et s'insère dans une réflexion sur la sécurité piétonne autour des bâtiments scolaires et au long des cheminements empruntés par les élèves. Les flux d'écopiers domicile-école ont ainsi été modélisés afin de mettre en avant les rues et les intersections de la ville théoriquement les plus parcourues. Le dernier chapitre (2014) relate l'approche utilisée pour évaluer la localisation d'une nouvelle école en bordure de Lausanne (Malley-Centre).

L'organisation scolaire lausannoise en quelques mots

Ces quelques projets sont la trace d'un contexte démographique, législatif et politique en constant mouvement, voire en mutation. De 2009 à 2014, la population résidente est passée de 133'265 à 140'228 habitants² (+ 6'963 hab.), le nombre d'élèves dans l'école publique obligatoire passant quant à lui de 12'318 à 13'474 (+1'155 élèves)³, soit l'organisation d'environ 60 classes supplémentaires (avec une moyenne de 20 él./classe). Malgré l'existence d'une certaine marge de manœuvre au sein des structures d'accueil existantes, cette hausse des effectifs a nécessité la réaffectation de nombreux locaux, l'agrandissement de plusieurs écoles et l'installation de modules d'extension sur certains sites. Cette croissance démographique devrait perdurer au vu des 10'398 logements prévus à l'horizon 2023-25 et parmi lesquels 2'088 devraient voir le jour d'ici à 2018 (fig.3.9). Fin 2013 la ville comptait 75'025 logements pour 12'436 écopiers, les élèves vivent ainsi en moyenne dans 16.5% des logements. On peut toutefois s'attendre à ce qu'en réalité ce pourcentage soit plus bas étant donné que plusieurs élèves peuvent résider dans un même lieu d'habitation. D'un autre point de vue les effectifs de l'école publique obligatoire représentent un peu moins de 10% de la population totale résidente⁴. Pour chaque gros projet de quartier, les différents acteurs (architectes, urbanistes,...) collaborent avec le SEPS afin d'établir des prévisions qui tiennent compte du nombre d'habitants prévus, du type (subventionné ou non) et de la taille des futurs logements (nbr. de pièces). Cette opération est complexe mais

2. Source : SCRIS Lausanne

3. Source : rapports de gestion du SEPS

4. 13'474 élèves (au 1.10.2014) pour une population totale de 140'228 habitants (au 31.12.2014, source SCRIS).

nécessaire à la planification des besoins en infrastructures scolaires et parascolaires.

Pour en venir à l'organisation scolaire, le SEPS est globalement chargé de ⁵ :

- contribuer à l'organisation générale des classes lausannoises.
- venir en appui des établissements dans la gestion quotidienne des écoles.
- organiser la prise en charge parascolaire pour les élèves dès la 7e année.
- de la gestion des transports scolaires ainsi que de l'entretien des bâtiments.
- de la planification et des constructions scolaires.

L'école obligatoire est actuellement structurée en 11 années. L'entrée en vigueur du concordat Harmos en 2013 a défini le niveau primaire comme s'étendant de 4 à 10 ans et représentant les huit premières années (notées 1P,..., 8P) de la scolarité obligatoire. Le niveau secondaire est quant à lui composé des années 9 à 11 (notées 9S, 10S, 11S) et couvre la tranche d'âge allant de 10 à 15 ans ⁶. Auparavant, le niveau primaire était constitué des six premières années (1P,..., 6P) divisées en un cycle initial de deux ans (CIN, école enfantine) et en deux cycles primaires de deux ans chacun (CYP1, CYP2). Les différents projets ayant été réalisés à des moments différents, le tableau 3.1 expose les deux structures présentes dans la suite du travail et dans les documents annexés.

Un établissement scolaire est un secteur géographique comprenant un ensemble d'écoles qui permettent d'accueillir les élèves du secteur. Les élèves de 1P à 6P sont répartis depuis la rentrée 2015 dans 8 établissements primaires (EP) comprenant 47 écoles de petite ou de moyenne taille, tandis que les volées 5P à 11S sont scolarisées dans sept établissements mixtes primaires et secondaires (EPS) faits de 13 complexes scolaires. Cette différence du nombre d'écoles entre les deux niveaux est le résultat d'une politique de gestion spatiale menée depuis de nombreuses années et visant à offrir une plus grande proximité domicile-école aux plus jeunes élèves. Le principe sous-jacent étant que plus un élève grandit, plus son autonomie et sa capacité de déplacement se développent. En termes d'organisation spatiale cela se traduit par le fait que les écoles consacrées aux plus jeunes sont plus petites et parsemées sur l'ensemble du territoire, alors que les plus âgés sont accueillis dans des grands complexes beaucoup moins nombreux impliquant un éloignement domicile-école plus grand. À cette

5. <http://www.lausanne.ch/thematiques/scolarite-lausanne/scolarite-obligatoire/organisation-des-ecoles-lausannoises.html>

6. L'âge de l'élève est donné à titre indicatif, il repose sur l'hypothèse d'un parcours scolaire sans échec

“Pré-HarmoS”			“HarmoS” (dès 2013)					
Niveau	Année	Code	Niveau	Année	Code	Âge au 31.7	Nbr d'él. R14	
Primaire	-2	CIN	Primaire	1	1P	4	1'326	
	-1			2	2P	5	1'239	
	1	CYP1		3	3P	6	1'243	
	2			4	4P	7	1'288	
	3	CYP2		5	5P	8	1'089	
	4			6	6P	9	1'091	
Secondaire	5	CYT	Secondaire	7	7P	10	1'026	
	6			8	8P	11	1'110	
	7	VSB		9	9S	12	1'009	
	8	VSG		10	10S	13	1'106	
	9	VSO		11	11S	14	1'114	
Classes spéciales (ACC, DES, DEP, OESP, OESS, VER) et de raccordement (RAC)						-	833	
						Total	13'474	

TABLE 3.1 Degrés scolaires avant et après l’entrée en vigueur (2013) de la nouvelle loi scolaire. La dernière colonne indique les effectifs observés au 1.10.2014 (R14), on remarque que les volées 1P-4P sont clairement plus peuplées que celles des degrés supérieurs 5P à 11S.

organisation spatiale se superpose une politique de transports scolaires cohérente. La ville de Lausanne a en effet été la première ville suisse à instaurer des Pédibus⁷ permettant aux plus jeunes (~ de 4 à 7 ans) d’être conduits à pied à l’école par quelques parents bienveillants. À l’heure actuelle il y a 41 lignes d’en moyenne 600 m et de longueur totale de 25 km. Les élèves plus âgés peuvent obtenir des subventions pour les transports publics en fonction de l’éloignement de leur lieu de scolarisation.

Historiquement, ces quelques éléments du paysage scolaire lausannois sont l’héritage d’une réforme datée de 1984 et décrite par G. Dyens (2012) dans l’annexe B “Organisation des établissements scolaires de la région Lausanne à l’horizon 2015-2020” :

“La loi scolaire de 1984 a modifié profondément les structures et l’organisation de l’école vaudoise. Lausanne a joué alors le jeu de cette réforme historique et aura investi globalement entre 200 et 300 millions en 25 ans pour l’adaptation de son parc immobilier. C’est donc en application de la nouvelle loi scolaire de 1984 que la carte scolaire a été entièrement redessinée pour la rentrée 1986. Cette réorganisation a été

7. <http://www.lausanne.ch/pedibus>

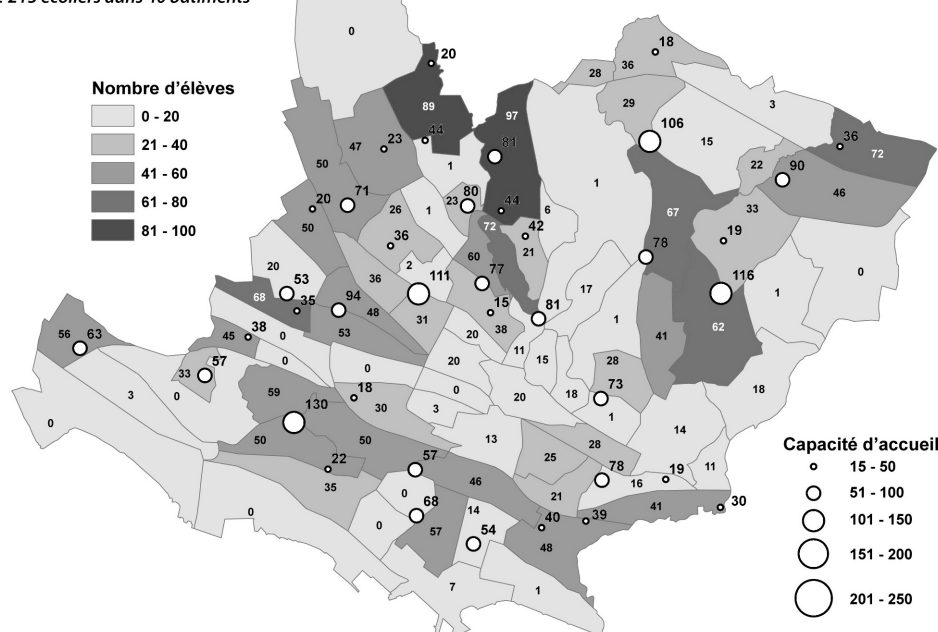
marquée par un double mouvement : celui d'une décentralisation concentrée en vue de la création de sept grands ensembles scolaires secondaires destinés à accueillir tous les élèves de la 5e à la 9e (7P-11S) , et celui fondé sur une logique de proximité pour tous les autres bâtiments accueillant des élèves des classes enfantines et primaires comprenant les 6 volées de -2 à +4 (1P - 6P). Cette réorganisation complète de la répartition des classes lausannoises s'est donc traduite par un recentrage des zones de recrutement des classes -2 à +4 (1P-6P) autour de chacun des bâtiments « restés » tout ou partiellement primaires, et par le création de zones de recrutement plus étendues, par déplacement progressif, opéré sur plusieurs années, de tous les élèves devenus secondaires vers les sept complexes scolaires progressivement aménagés pour les accueillir. Les plus gros changements sont intervenus dans les secteurs nord et nord-est de la ville, qui ne comprenaient pas de collège secondaire avant 1986.”

Les cartes de la figure 3.8 apportent une visualisation de l'organisation spatiale des niveaux primaires 1P-2P (haut) et des 7P-8P (de niveau secondaire avant Harmos). Les cartes des niveaux 3P à 6P peuvent être consultées dans l'annexe E.

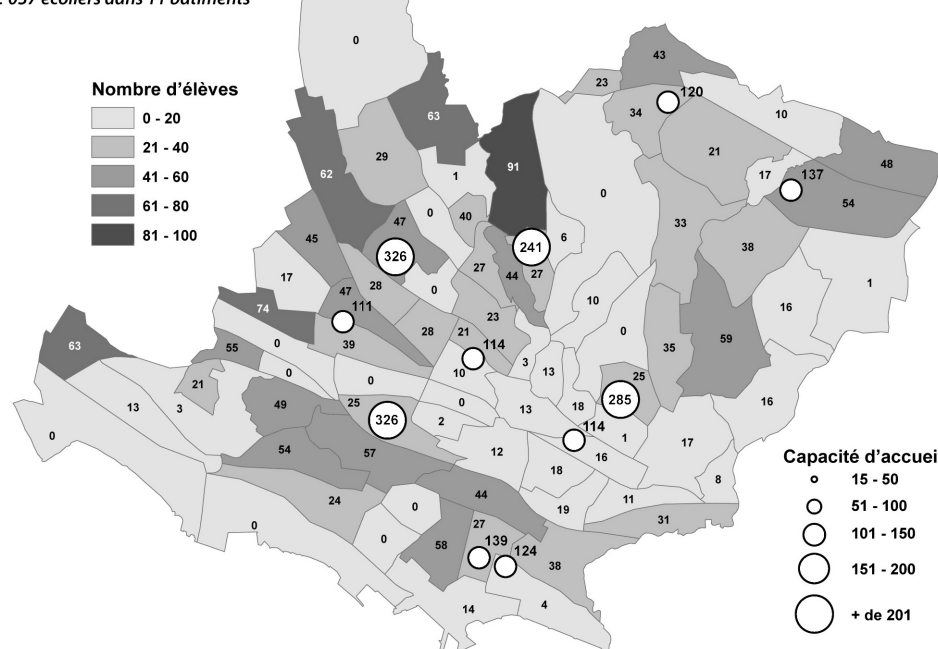
Pour la suite l'accent sera principalement mis sur les aspects méthodologiques et techniques des différents projets. Pour chacun d'eux et à titre complémentaire, des rapports qu'on pourrait qualifier de centraux sont annexés à la thèse afin que le lecteur puisse, s'il le désire, se faire une idée plus approfondie des enjeux et de l'étendue des projets présentés. On précisera que ces annexes ainsi que certaines illustrations de ce chapitre ont été initialement conçues pour des publics variés (SEPS, sphère politique, internet,..) auxquels il s'agit de s'adresser de manières différentes, elles peuvent donc être marquées d'une certaine simplicité de langage et d'une nécessaire vulgarisation scientifique.

Bassins de population d'élèves

Niveau Harnos 1-2 (Enfantines)
2'215 écoliers dans 40 bâtiments

**Bassins de population d'élèves**

Niveau Harnos 7-8 (CYT5 et 6)
2'037 écoliers dans 11 bâtiments



Données scolaires selon enclassement 2010-2011

FIGURE 3.8 Population scolaire (R10) par quartiers statistiques et répartition spatiale des écoles pour les 1P-2P (haut) et 7P-8P (bas). Ces deux cartes illustrent l'organisation spatiale de l'accueil scolaire. Dans une logique d'une plus grande proximité domicile-école pour les plus jeunes, les écoles qui leur sont dédiées sont nombreuses, plutôt de petite capacité et sont réparties sur l'ensemble du territoire (haut). À l'inverse, les élèves plus âgés sont enclassés dans de grands complexes scolaires beaucoup moins nombreux (bas).

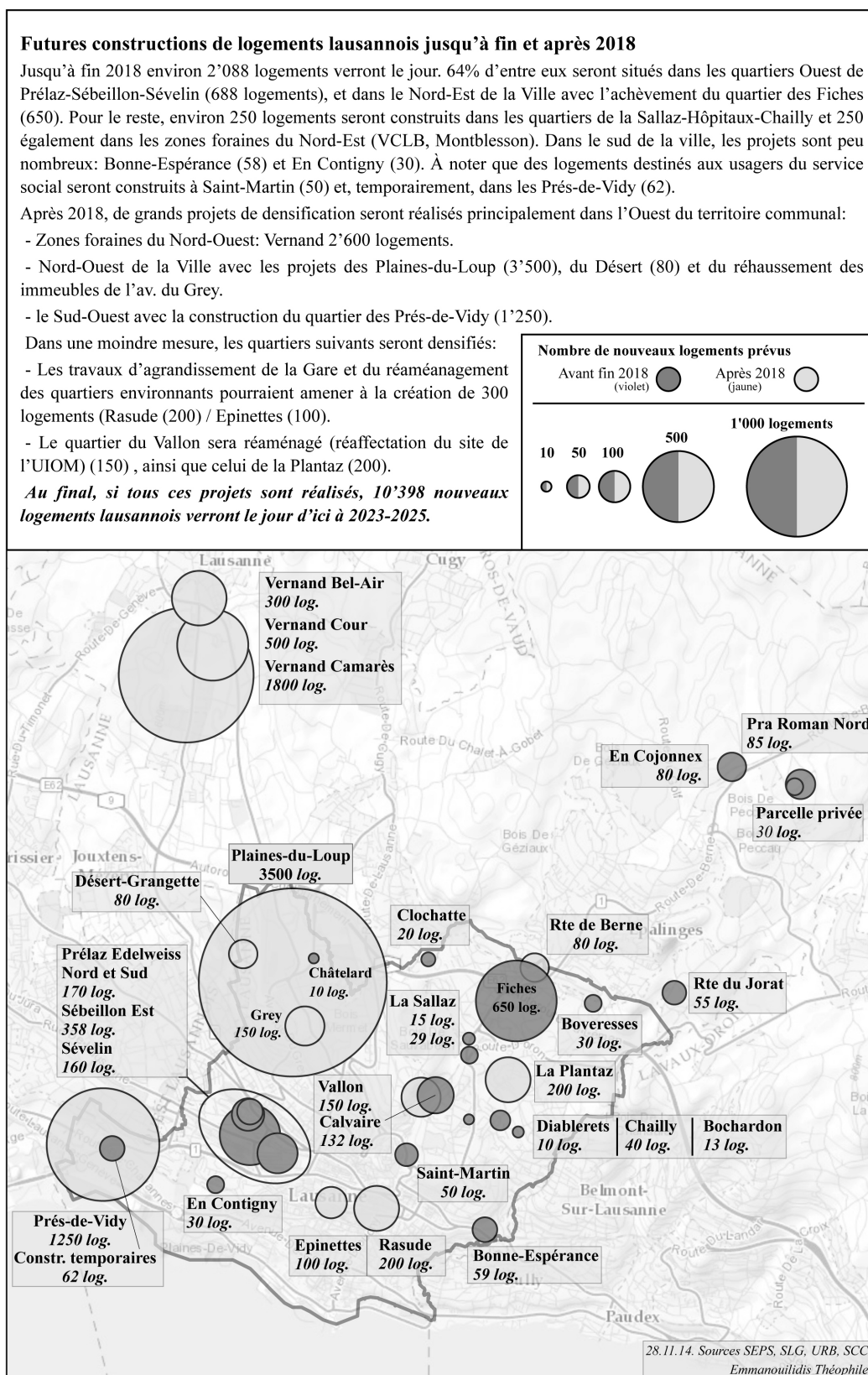


FIGURE 3.9 Constructions de logements projetées à l'horizon 2023-25 sur la commune de Lausanne.

Chapitre 4

Système d'attribution d'abonnements de bus pour les écoliers

Initié en 2007, ce projet a été mis en œuvre en 2010 et permet encore actuellement d'attribuer chaque année plus de 9'000 subventions aux écoliers et jeunes lausannois âgés de 11 à 20 ans. Il a globalement consisté à effectuer une refonte complète du mode d'attribution et de gestion des abonnements de bus pour les écoliers lausannois. Ce changement a été provoqué essentiellement par une impulsion politique, et plus précisément par le passage d'un ancien règlement cantonal de transport scolaire au niveau communal. À la suite de cette modification législative, M. Grégoire Junod a déposé à la Municipalité de Lausanne un postulat intitulé : « Des transports publics gratuits pour les enfants et les jeunes de moins de 20 ans » (2006). En toute logique, c'était au SEPS de répondre à ce postulat puisqu'il en était le principal concerné et s'occupait déjà de tout ce qui touchait le transport scolaire, notamment l'attribution d'abonnements de bus. La réponse officielle du SEPS (2009) constitue l'annexe A.

4.1 Historique

Avant la mise en œuvre du projet en 2010, seuls les élèves résidant à plus de 2.5km de leur école avaient le droit à un abonnement gratuit¹. Cela représente un trajet

1. En 2005, la Ville a dirigé une étude comparative concernant les transports scolaires en Suisse. Genève et Fribourg ne distribue aucun abonnement gratuit (sauf cas exceptionnel). À Berne seuls les élèves des classes spéciales habitant à plus de 2.5km ont droit à la gratuité des transports publics. À Bâle et à Yverdon la distance limite est de 2.5km, contre 1.5km à Neuchâtel (uniquement pour les

théorique quotidien de 10 km à pied par jour pour les élèves rentrant à domicile à midi. Une telle distance est irréaliste, surtout en milieu urbain doté d'un trafic dense et muni d'un réseau de transports publics² bien développé. Pour l'année scolaire 2007-2008, seul 7% des 12'332 écoliers bénéficiaient de la gratuité des transports publics (892 abonnements). La conséquence fut que de très nombreux parents finançaient eux-mêmes l'abonnement de leur enfant, ce qui allait à l'encontre du principe de la gratuité de l'école publique et pouvait mettre des familles en difficulté en situation délicate. L'administration a ainsi dû multiplier les dérogations à la règle rendant la politique de transports scolaires de plus en plus incohérente et inégalitaire. La refonte de cette politique avait pour but d'amener à une gestion plus cohérente et transparente des subventions et concerner un pan plus large de la population scolaire.

Dès la fin 2007, le SEPS s'est ainsi lancé dans le géoréférencement des données scolaires et dans la création du réseau piétonnier de l'ensemble de la ville (chap.II.II). La solution SIG mise en place permettait un calcul informatique de la distance domicile-école, alors que précédemment cette distance était mesurée sur une carte à l'aide d'un curvimètre. Une approche réalisable ponctuellement mais moins concevable pour traiter plus de 12'000 cas. Le système informatique a été opérationnel en 2008 et les premiers résultats sont relatés dans le tableau 4.1. Ce dernier indique le nombre d'abonnements à subventionner en fonction de la distance domicile-école (par intervalle de 250 m. On y observe que la gratuité pour tous les écoliers était estimée à environ à 4,6 millions de francs. Les abonnements des écoliers situés à moins de 1 km coûtant à eux seuls un peu plus de 3 millions de CHF (3,5 millions à 1250mètres) et ceux supérieur à 1 km environ 1,5 millions de CHF. À titre comparatif, ce montant était d'environ 450'000 CHF francs en 2007 avec une limite de subvention à 2.5 km.

primaires), alors que Bienne, attribue un abonnement à partir d'une distance domicile-école de plus de 1km. Sion a fixé une limite de 1250m pour les élèves des classes primaires et 2km pour ceux du niveau secondaire. À Zürich la gratuité est proposée autour de 4 distances correspondant au degré scolaire, à savoir : 1km pour les enfantines, 1400m pour les 1 et 2P, 1600m pour les 3 et 4P, et 2km à partir de la 5ème année de scolarité.

2. "TL" pour transports publics de la région lausannoise.

Distance domicile-école	Nombre d'abonnements	Coût total	Coût cumulatif	Coût cumulatif inversé
0-250m	921	340'317	340'317	4'606'668
251-500m	3'025	1'117'395	1'457'712	4'266'351
501-750m	2'366	882'648	2'340'360	3'148'956
751-1000m	2'089	775'521	3'115'881	2'266'308
1001-1250m	1'122	415'422	3'531'303	1'490'787
1251-1500m	672	249'138	3'780'441	1'075'365
1501-1750m	513	191'403	3'971'844	826'227
1751-2000m	352	131'058	4'102'902	634'824
2001-2250m	333	125'217	4'228'119	503'766
2251-2500m	196	74'898	4'303'017	378'549
2501m et +	743	303'651	4'606'668	303'651
Total	12'332	4'606'668	-	-

TABLE 4.1 *Coût des subsides par intervalle de 250 m. Le prix de l'abonnement annuel était de 369 CHF en 2008 contre 459 CHF actuellement.*

Ces résultats ont rendu possible l'élaboration de deux scénarios principaux de subventionnement :

- Le scénario dit de la “municipalité” propose que lorsque la distance entre le domicile et le bâtiment scolaire est supérieure à 2 km, la ville prend en charge la totalité de l'abonnement de bus. Au-dessous de 2km, trois intervalles sont considérés : de 0 à 1000 m, de 1001 à 1500 m et de 1501 à 2000 m. Pour chacun d'eux, la commune contribue respectivement à : 25%, 50% et 75% du prix de l'abonnement. Ce scénario a l'avantage de proposer un subside à tous les écoliers. Il a toutefois été abandonné car au final la gratuité n'est octroyée qu'à plus de 2km, et il reposerait entièrement sur la précision du calcul des distances. Des corrections ou des mises-à-jour du réseau impliqueraient inévitablement de reconsidérer le subventionnement de nombreux élèves n'ayant pourtant ni déménager ni été affectés à une autre école.
- Le scénario retenu et actuellement en vigueur (tab.4.2)³ propose un abonnement annuel gratuit si la distance domicile-école est supérieure à 1km. Ce subside est accordé uniquement à partir de la 5P (8 ans), les plus jeunes disposant

3. <http://www.lausanne.ch/thematiques/scolarite-lausanne/journee-ecolier/transports-et-mobilite.html>

à la fois du réseau Pédibus et de la carte Junior leur permettant d'utiliser gratuitement les transports publics s'ils sont accompagnés de leur parent. À partir de la 7^{ème} année, un bon de réduction de 50% sur le prix de l'abonnement annuel est proposé à ceux résidant à moins de 1km de leur lieu de scolarisation. Les jeunes de 11 à 20 ans (écoles privées, étudiants, apprentis, universitaires et gymnasiens) bénéficient automatiquement d'un bon de réduction de 50%.

Année scolaire / âge	Distance	Donnant droit
5e et 6e année	Moins de 1 km	Pas d'abonnement/Pas de bon
5e et 6e année	Plus de 1 km	Abonnement annuel gratuit
7e à 11e année	Moins de 1 km	Bon de 50% de réduction sur l'abonnement annuel
7e à 11e année	Plus de 1 km	Abonnement annuel gratuit
Jeunes de 11 à 20 ans (révolus au 31 juillet) domiciliés à Lausanne (écoles privées, étudiants, apprentis, universitaires et gymnasiens)	-	Bon de 50% de réduction sur l'abonnement annuel
Un montant est perçu pour les frais administratifs, de 20.- pour les élèves (40.- maximum par famille) et de 40 CHF pour les jeunes. En cas de déménagement l'élève conserve son abonnement jusqu'à la fin de l'année scolaire.		

TABLE 4.2 Critères et types de subvention (2015)

Les réflexions ayant amené à cette nouvelle politique de transport scolaire sont nombreuses (annexe A, chap.6). En synthèse, une distance de 1km représente une durée de marche d'environ 15 à 20 minutes deux ou quatre fois par jour, soit une activité physique raisonnable et bénéfique pour la santé. Le système des bons de réduction élargit l'offre à la quasi-totalité des enfants et des jeunes et constitue en ce sens une mesure d'encouragement à l'usage des transports publics. L'abonnement est valable sur l'ensemble du réseau et pendant les vacances scolaires, les élèves peuvent donc en faire usage pour d'autres activités et, par là, découvrir leur ville. De manière globale, on peut s'attendre à ce qu'une plus grande fréquentation des transports publics par la population scolaire engendre une diminution du trafic aux alentours des écoles.

4.2 Subventions 2010-2013

Le système étant en opérationnel depuis 2010, le tableau 4.3 relate les subventions accordées en distinguant le type (abonnement annuel ou bon de réduction), le public auquel elles sont destinées. Chaque cellule contient quatre valeurs correspondant à l'année des résultats (de 2010 à 2013). Globalement les élèves primaires sont moins nombreux que les secondaires à être au bénéfice d'un abonnement gratuit. Cela s'explique par le fait que l'offre concerne uniquement les volées 3P-4P ayant en général une plus grande proximité scolaire que les niveaux supérieurs. Le taux d'utilisation, signifiant que l'élève acquiert l'abonnement, varie d'année en année, mais il reste plus bas (entre 80 et 89%) chez les primaires, que chez les secondaires où l'offre est plus qu'appréciée (99% en 2011 et 2012). On observera annuellement une légère hausse du nombre de subventions allouées, passant de 3'075 abonnements en 2010 à 3'409 en 2013, soit un coût annuel d'environ 1.5 millions de CHF. Les bons de réduction de 50% sont utilisés par environ la moitié des élèves concernés, soit 1'463 en 2013 pour un coût d'environ 300'000 CHF. Au final le montant des subventions accordées aux écoliers se monte à environ à 1.8 millions de CHF par année. Le canton couvre les trois-quarts de ces frais et la Ville de Lausanne le quart restant.

Les bons accordés aux jeunes hors de la scolarité obligatoire sont quant à eux entièrement à la charge de la Ville. Leur population a légèrement baissé, passant de 7'921 personnes en 2011 à 7'553 en 2013. Le nombre de subsidiés a quant à lui augmenté de 3'740 subsidiés en 2011 (~700'000 CHF) à 5'706 en 2013 (+53%!) soit un budget légèrement supérieur à 1 millions de CHF.

Attestation abonnement	Envoyées (2010/2011/2012/2013)	Utilisées	Taux d'utilisation
Élèves primaires	414 / 470 / 457 / 1474*	364 / 377 / 378 / 1'320*	88% / 80% / 82% / 89%*
Élèves secondaires	2'939 / 2'924 / 3'015 / 2'157*	2'711 / 2'904 / 2'988 / 2'089*	92% / 99% / 99% / 96%*
Total	3'353 / 3'394 / 3'472 / 3'631	3'075 / 3'281 / 3'366 / 3'409	92% / 96% / 96% / 93%
<i>*Application de la LEO, déplacement de deux années du secondaire vers le primaire.</i>			
Bon 50%	Envoyés	Utilisés	Taux d'utilisation
Élèves	- / 2'842 / 2'723 / 2'696	- / 1'269 / 1'460 / 1'463	- / 45% / 53% / 52%
Jeunes	- / 7'921 / 7'678 / 7'553	- / 3'740 / 4'248 / 5'706	- / 47% / 55% / 57%
Total	9'893 / 10'763 / 10'401 / 10'249	4'124 / 5'009 / 5'706 / 5'825	42% / 46% / 54% / 56%

TABLE 4.3 Historique des subventions pour les rentrées 2010 à 2013.

4.3 Aspects techniques et réalisation

Comme mentionné précédemment, la gratuité des transports publics est offerte aux élèves devant parcourir plus de 1km pour se rendre à l'école. Plutôt que de calculer pour chaque élève cette distance, l'idée est de créer, autour de chaque école, un polygone de subvention (fig. 4.1). Pour ce faire, des zones de desserte de 900m, 1000m et 1100m sont générées (fig., fig.5 p.xxvi) pour guider le tracé manuel d'un polygone de subvention et pour l'adapter au tissu urbain. Cette étape relativement chronophage est toutefois fondamentale pour tenter de limiter les contestations et assurer une cohérence au projet. Concrètement cela consiste à faire en sorte que le tracé traverse préférentiellement des zones non-résidentielles, ou tout autre élément marquant une rupture spatiale du cadre bâti et habité. On évitera également que ces limites de subvention coupent un immeuble en deux et on fera en sorte de les adapter au mieux au cadre architectural du quartier. Cet affinage nécessite une certaine marge de manœuvre. Pour l'ensemble des 46 zones tracées, la limite de subvention se situe au minimum à 850m de l'école et au maximum à 1050m. En 2014, les zones ont été défavorables pour 69 élèves sur 5'996 (~1.2%) qui n'ont pas obtenu d'abonnements alors qu'ils résidaient à plus de 1 km. À l'inverse elles ont été favorables pour 234 élèves (3.9%) qui s'étaient vu octroyer un abonnement avec une distance domicile-école inférieure à 1 km.

À comparer d'un système basé uniquement sur la distance domicile-école, l'ap-

proche par zone de subvention est beaucoup moins sensible aux corrections et mises-à-jour du réseau. En terme de communication elles sont plus parlantes, et rend la gestion administrative relativement simple. Grâce à leur implémentation dans le guichet cartographique de la Ville, une secrétaire peut très facilement visualiser la zone de subvention et l'adresse d'un nouvel élève afin de lui octroyer ou non un subside.

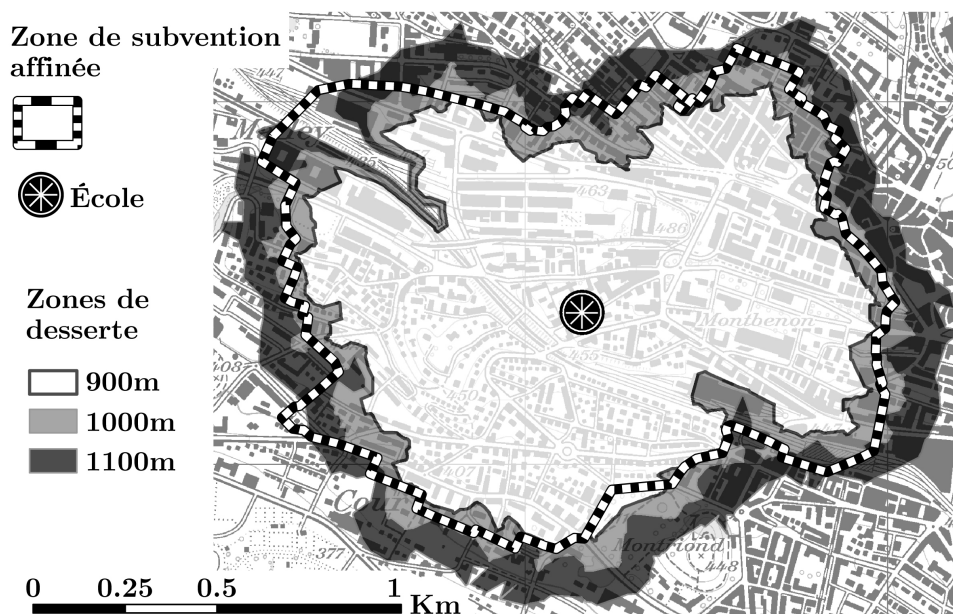


FIGURE 4.1 Création d'un polygone de subvention basé sur des zones de desserte de 900m, 1000m et 1100m autour de l'école du Belvédère.

Techniquement la chaîne de traitement pour octroyer les subventions est exposée dans la figure 4.2. L'approche consiste à déterminer pour chaque élève si son lieu de résidence est situé ou non à l'intérieur du polygone de subvention de l'école qu'il fréquente. S'il est situé en dehors il obtient un code "out", et un code "in" sinon. Ce code est ensuite mis en rapport avec le niveau scolaire de l'élève pour établir le type de subvention finale. Au vu des budgets investis un processus de vérification a été mis en place. Il consiste à établir différentes statistiques globales ou détaillées comme le nombre et le type de subventions accordées par école l'année précédente. Visuellement, on vérifie que le type de subvention est correct en superposant les élèves et la zone de leur école.

Les deux premières années les erreurs ont été nombreuses et provenaient principalement d'un mauvais ou d'une absence de géoréférencement des élèves. Bien que la situation se soit améliorée avec le temps, les bases de données scolaires ont été et sont encore sujettes à de nombreuses modifications. À chaque printemps le système doit ainsi être testé et réadapté afin d'être opérationnel en juillet. Après cinq ans de

fonctionnement le système n'a été que très rarement contesté, et la nouvelle politique de gestion des transports scolaires a été fortement appréciée par la population lausannoise, hormis peut-être, lorsqu'à la sortie des cours des cohortes d'élèves envahissent et animent les bus et métros de la capitale vaudoise.

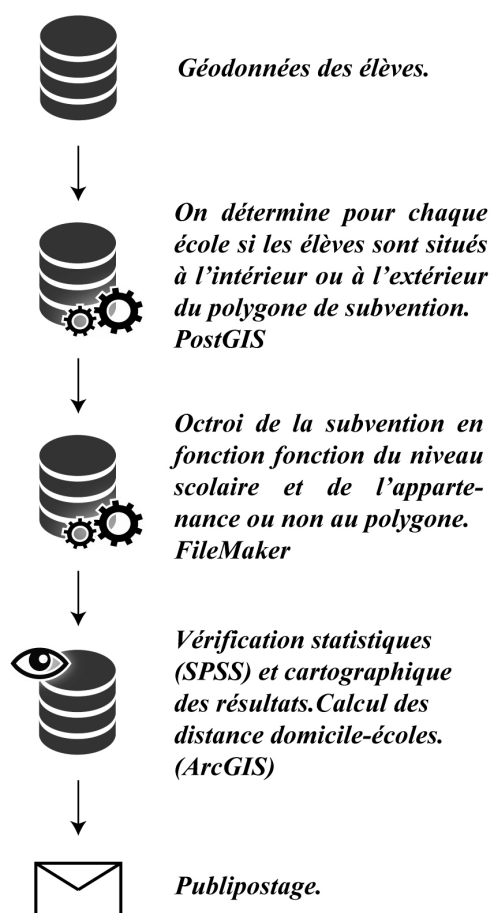


FIGURE 4.2 Traitement du fichier des élèves pour l'octroi de subventions.

Chapitre 5

Création d'établissements scolaires et modélisation d'enclassement

Jusqu'en 2008, le SEPS ne disposait pas d'outils informatiques lui permettant de mesurer les distances domicile-école. L'attribution des élèves aux différents bâtiments scolaires se faisait donc sur la base de connaissances acquises avec le temps. Année après année, une base de données permettant de lier les lieux de domicile à une ou deux écoles a été construite. À chaque été, y compris en 2015, cette base est interrogée afin de créer le schéma d'attribution de la rentrée (communément intitulé "plan de rentrée"). Sans être parfaits, les résultats sont ensuite discutés par les différentes directions d'établissement. Cette approche s'est toutefois petit à petit heurtée au dynamisme de la ville impliquant globalement une hausse de la population scolaire, et donc une marge de manœuvre au niveau de l'accueil scolaire de plus en plus réduite. L'opération d'attribution est ainsi devenue de plus en plus délicate à réaliser. L'augmentation de la population scolaire a fait gonfler les effectifs des établissements différents établissements scolaires engendrant de facto à des charges de travail de plus en plus lourdes à gérer pour une seule direction. À ce phénomène démographique sont venus s'ajouter la révision de la LEO et le concordat Harmos ayant eu notamment¹ pour effets de rendre obligatoire l'école à partir de 4 ans (1P) , ou encore, d'étendre le niveau primaire jusqu'à la 8^{ème} année.

C'est dans ce contexte que le SEPS a sollicité notre collaboration pour un projet visant à redéfinir les limites des établissements primaires. La première section 5.1 offre un aperçu du cadre général et des lignes directrices du projet. La deuxième section 5.2 expose la méthode utilisée pour créer de nouveaux établissements au travers de l'al-

1. Plus de détails et de conséquences liés aux réformes scolaires peuvent être obtenus dans l'annexe B

gorithme de transport optimal régularisé. La dernière section 5.4 propose d'évaluer le schéma d'attribution observé à la rentrée 2014 en le comparant aux schémas résultant de modélisations d'enclassement².

5.1 Redéfinition des établissements primaires

5.1.1 Situation initiale

Afin d'évaluer la situation générale des établissements³ une étude a été réalisée en 2011 (annexe D). En synthèse ces travaux ont montré qu'environ 88% des élèves primaires (1P-6P) habitaient à moins de 1km de leur école alors que ce taux n'était que de 51% pour les secondaires (7P-11S). Un peu moins de 8% des élèves n'étaient pas scolarisés dans l'établissement scolaire dans lequel ils résidaient. Les causes sont multiples et demeurent encore les mêmes actuellement. On mentionnera par exemple qu'un élève déménageant en cours d'année peut terminer l'année scolaire sans changer d'école. Les parents des élèves de 1ère année peuvent, pour faciliter leur quotidien, faire une demande pour choisir l'école de leur enfant (sous réserve de place disponible). À cela s'ajoute également le phénomène de remplissage des classes, c'est-à-dire qu'il est plus équitable pour les élèves et les enseignants, et économiquement plus intéressant d'ouvrir une seule classe de 18 élèves dans une seule école plutôt que d'ouvrir deux classes de 9 dans deux bâtiments séparés. Spatialement on observe 5.1 (b) que les élèves scolarisés dans un autre établissement que celui dans lequel ils résident tendent à se regrouper autour des frontières des bassins de recrutement. La figure 5.1 (a) offre quant à elle une visualisation de la répartition des écoles et de leur capacité respective au sein des cinq établissements instaurés en 1986. La comparaison de la population scolaire résidant à l'intérieur des limites d'établissements entre 2010 et 2014 témoigne de la croissance démographique de la ville, particulièrement marquée dans les établissements d'Entre-Bois et de Mon-Repos.

5.1.2 Principes et lignes directrices

Afin d'orienter le travail et de mener à bien la redéfinition des établissements, on énumérera ici une liste de lignes de principes et de lignes directrices :

- Une dimension de l'établissement comprenant entre 800 et 1000 élèves.

2. On entend par enclassement le fait d'attribuer une classe à un élève. On considérera pour la suite ce terme et le verbe enclasser comme des synonymes des termes "attribution" et "attribuer"

3. Où synonymement "bassins" ou "zones" de recrutement

Répartition des écoles et limites d'établissements R14 (1P-6P)

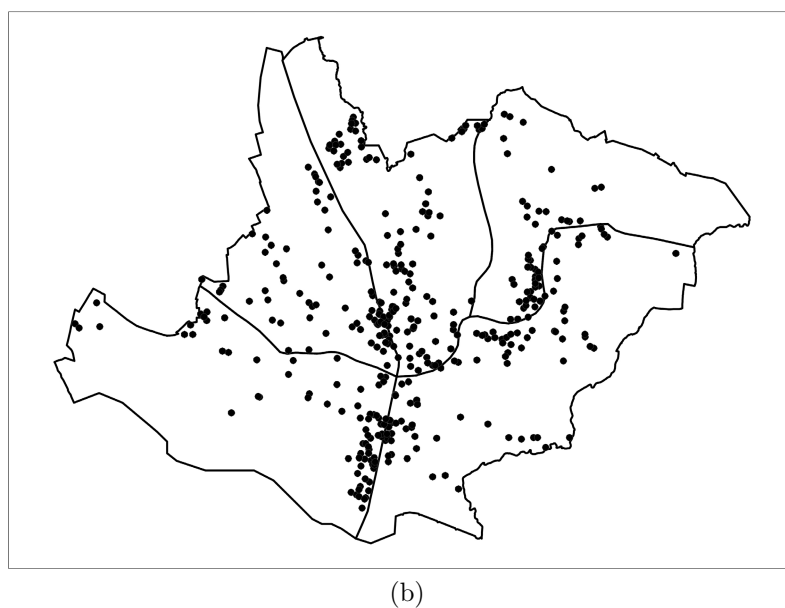
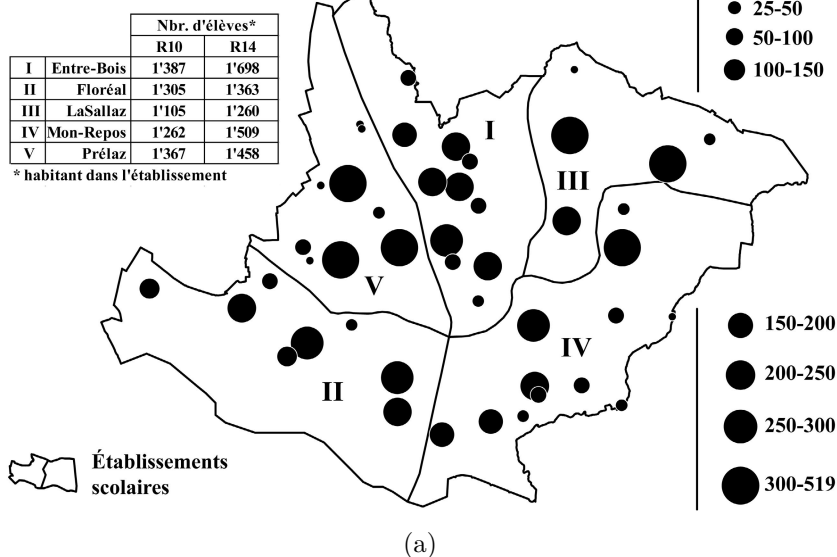


FIGURE 5.1 (a) : Répartition des écoles au sein des établissements primaires 1P-6P.
(b) : élèves 1P-6P scolarisés dans un autre établissement que celui dans lequel ils résident.

- Les limites d'établissements doivent être valables pour l'ensemble des niveaux scolaires (1P-6P ou 1P-8P)
- Un équilibre entre la population scolaire d'un établissement et sa capacité d'accueil.
- Les écoles sont rattachées à l'établissement dans lequel elles se situent.
- La proximité domicile-école doit être favorisée, particulièrement pour les plus jeunes élèves (1P-4P).
- Conserver une mixité sociale au sein des établissements. Cela présuppose des surfaces suffisamment grandes pour couvrir plusieurs quartiers.
- Un équipement adapté à l'âge des élèves et à leur degré de scolarité.
- Un accès facilité aux structures parascolaires.
- Une réorganisation limitant au maximum les investissements et les coûts supplémentaires en matière d'infrastructures scolaires.
- Conserver autant que possible les synergies existantes entre les bâtiments.
- Une prise en compte des futurs projets de construction de logements.
- Le nouveau tracé doit :
 - avoir idéalement certains traits de ressemblance d'avec l'ancien.
 - couvrir l'ensemble du territoire.
 - découper le tissu urbain de manière réfléchie. Des frontières traversant des secteurs densément peuplés tendent à favoriser les échanges entre les établissements. Les élèves situés autour de telles frontières peuvent être utilisés pour remplir ou désengorger les établissements. Ce phénomène est généralement moins marqué, voire inexistant, lorsque les frontières traversent des zones non-résidentielle (zones commerciales, industrielles, parcs publics,..).

Sur la base de ces nombreux éléments, différents scénarios de découpage d'établissements on été réalisés. Dans un premier temps les travaux ont porté sur la faisabilité d'établissements primaires Harmos 1P-8P (annexe E et annexe 8 section 1). En synthèse, différents scénarios visant la création de 8 à 10 établissements ont été élaborés. En toute logique, plus le nombre d'établissements est grand plus leur surface de recrutement tend à diminuer. Comme exposé à la figure 3.8 (p.72) , les bâtiments dédiés aux 7P-8P sont relativement moins nombreux que ceux consacrés aux 1P-6P. Un découpage du territoire en 8 ou 10 parties amène inévitablement au fait que certaines n'ont pas ou peu de places d'accueil 7P-8P alors que d'autres en ont beaucoup trop. En conséquence de quoi il faudrait ouvrir ou fermer des classes, et sans aucun doute reconsidérer la quasi-totalité de l'organisation des niveaux inférieurs. Pour éviter de se lancer dans une périlleuse et gargantuesque opération de restructuration dans un

contexte démographique de plus en plus contraignant, le SEPS a oeuvré à la mise en place et à l'acceptation d'une phase transitoire consistant à créer 8 établissements primaires. Les 7P-8P restant quant à eux assignés selon les limites d'établissements secondaires, renommées pour l'occasion en "établissements mixtes primaire-secondaire".

5.1.3 Méthodologie et zones d'attente

Un établissement est un ensemble d'écoles. Chacune d'elle possède une certaine zone d'attente⁴. Pour une école donnée cette zone est délimitée par le périmètre enveloppant les élèves qui la fréquentent (figure ci-dessous). Elle est par exemple petite pour une école de faible capacité et située dans un quartier fortement peuplé. Comme les pièces d'un puzzle, les zones d'attente contiguës peuvent ensuite être assemblées pour créer des établissements. Les zones d'attente peuvent être esquissées ou obtenues sur la base de l'enclassement observé ou sur la base d'une modélisation d'enclassement informatique (algorithme du transport optimal régularisé).



FIGURE 5.2 Une zone d'attente est un polygone qui contient tous les élèves d'une école.

4. Terme à comprendre dans son étymologie latine *ad-* "vers, en direction de" et *tendere* "tendre". La zone d'attente d'une école correspond à la zone englobant tous les élèves qui vont vers cette école. Bien évidemment l'appellation "zone de recrutement" est tout à fait admissible, mais pourrait prêter à confusion avec le terme "bassin de recrutement" (établissement scolaire) défini par l'agrégation de plusieurs zones d'attente (fig.5.5, b, p..93).

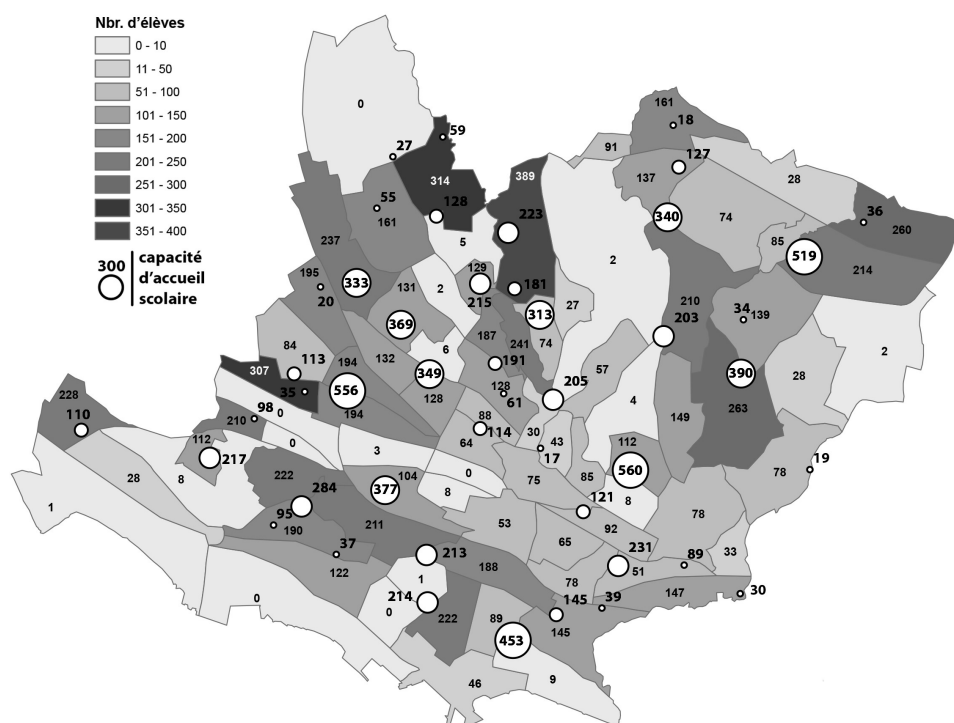
5.1.4 Étude préliminaire

Le but étant de tracer de nouveaux établissements scolaires, il s'agit de mettre en lien la population scolaire des quartiers avec la localisation et la capacité des différentes écoles comme illustré sur la figure 5.3 (1P-8P). On remarque que la population se répartit de manière plutôt hétérogène entre les différents quartiers, les valeurs les plus fortes sont situées à l'Ouest (Prélaz, Pierrefeur) et au Nord de la ville (Bois-Gentil, Bellevaux). Le centre-ville apparaît comme relativement peu peuplé en comparaison du reste. Le Sud est marqué par plusieurs discontinuités du cadre bâti (zones vertes, cimetière) et reste relativement peuplé, particulièrement dans les quartiers de la Bourdonnette, à Malley, à Montelly et dans les quartiers sous-gare. À l'Est, les effectifs sont relativement élevés à Praz-Séchaud/Grangettes, à Chailly/Sallaz, mais ils s'étendent sur des zones plus grandes qu'à l'Ouest. Au niveau de la capacité d'accueil, on observe à l'Ouest des bâtiments de moyenne et de grande tailles plus espacés les uns des autres que ceux de l'Est (p.ex Pierrefeur /Bergières /Prélaz /Beaulieu). On notera que le couple Béthusy/Mon-Repos représente la capacité maximale avec ses 560 places, alors que la population des quartiers avoisinant est plutôt faible, sa zone d'attente est donc relativement grande.

Pour établir des esquisses d'établissements, il est possible d'attribuer manuellement et de manière très grossière un ou plusieurs quartiers à une école. La figure 5.3 (b) est le résultat d'une telle démarche⁵. Le tracé des limites est très approximatif, pour un établissement donné rien ne garantit l'équilibre entre sa population d'élèves et sa capacité d'accueil. Les différents niveaux scolaires ne font qu'accentuer ce phénomène. Le fait que les niveaux 7P-8P sont organisés dans une logique spatiale différente que les 1P-6P rend leur agrégation compliquée. Malgré un manque évident de précision, cette approche a toutefois mis en avant que la réalisation d'établissements primaires 1P-8P nécessiterait de repenser la quasi-totalité de l'organisation des classes au sein des différentes écoles. Cela amènerait ainsi à reconsidérer l'organisation du corps enseignant, l'équipement des écoles (les besoins en infrastructures ne sont pas les mêmes pour une classe 1P que pour une 8P) et en toute vraisemblance impliquerait la réaffectation de nombreux élèves. Eu égard de ces éléments, les scénarios d'établissements 1P-8P ont été provisoirement abandonnés en 2012, et les études ont été orientées vers la redéfinition des limites 1P-6P.

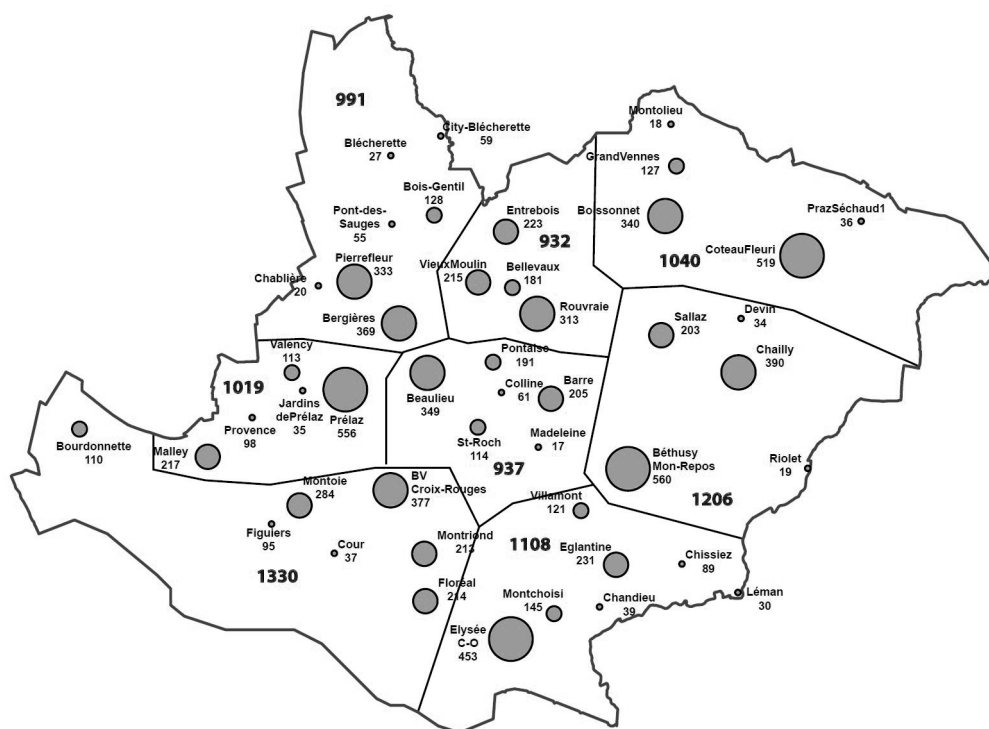
5. D'autres esquisses sont reportées dans l'annexe E

**Bassin de population scolaire et capacité d'accueil selon les quartiers statistiques
Harmos année 1-8 (8'501 élèves)**



(a)

8 établissements Harmos 1-8



(b)

FIGURE 5.3

5.1.5 Délimitation d'établissement par k-means

Nos premières recherches ont consisté à partitionner les lieux de résidence des élèves au travers de l'algorithme du k-means via un script développé par Mark Janikas en 2009⁶.

Cette approche a permis d'effectuer de multiples découpages du territoire urbain en un nombre de groupes définis à l'avance. La figure ci-contre expose les résultats obtenus sur l'ensemble des élèves 11'375 1P-11S de la rentrée 2010 pour un partitionnement en huit (haut) et dix groupes (bas). D'autres illustrations peuvent être consultées dans l'annexe C.

La méthode des k-means s'avère toutefois inadaptée pour définir des bassins de recrutement scolaire, et ce pour les raisons suivantes :

- Elle ne tient pas compte de la position et de la capacité des écoles.
- Elle ne tient pas compte des contraintes sur la taille de groupe.
- Elle considère les distances à vol d'oiseau et non pas celles du plus court chemin.
- La solution finale dépend des points de départ choisis, d'où une multitude de solutions possibles.

C'est dans ce contexte et pour répondre à ces "manques" que l'algorithme du transport optimal régularisé a été pensé et développé. Les sous-sections suivantes retracent les analyses et les résultats de son utilisation sur les données 1P-6P de la rentrée 2014.



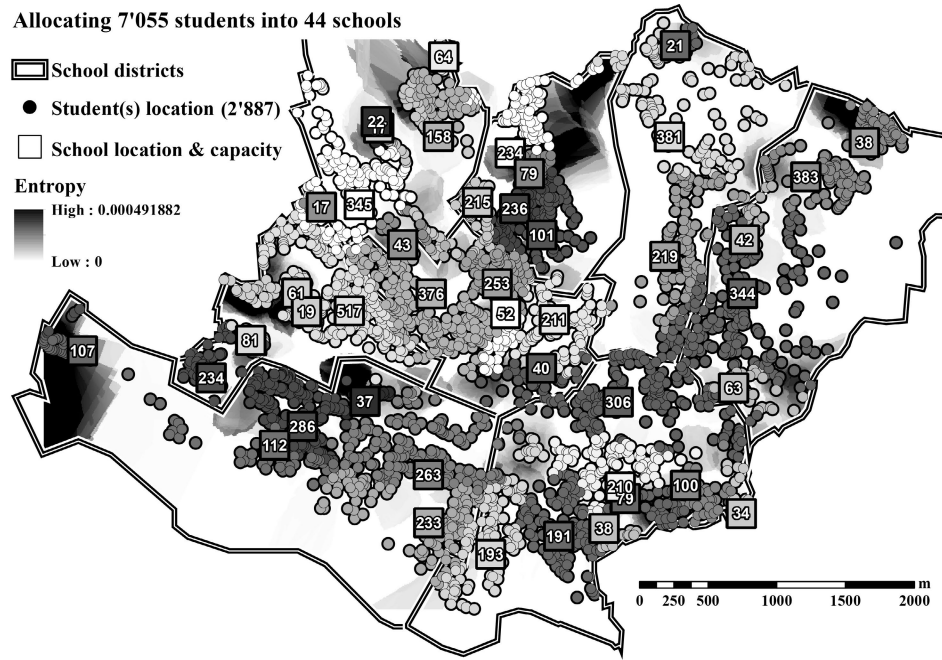
FIGURE 5.4

6. "R Point Clustering Tools for ArcGIS", Mark Janikas : <http://arcs-cripts.esri.com/details.asp?dbid=16444>. On notera que ce script utilise un package de R (clusttools) aujourd'hui abandonné et incompatible avec les versions récentes de R.

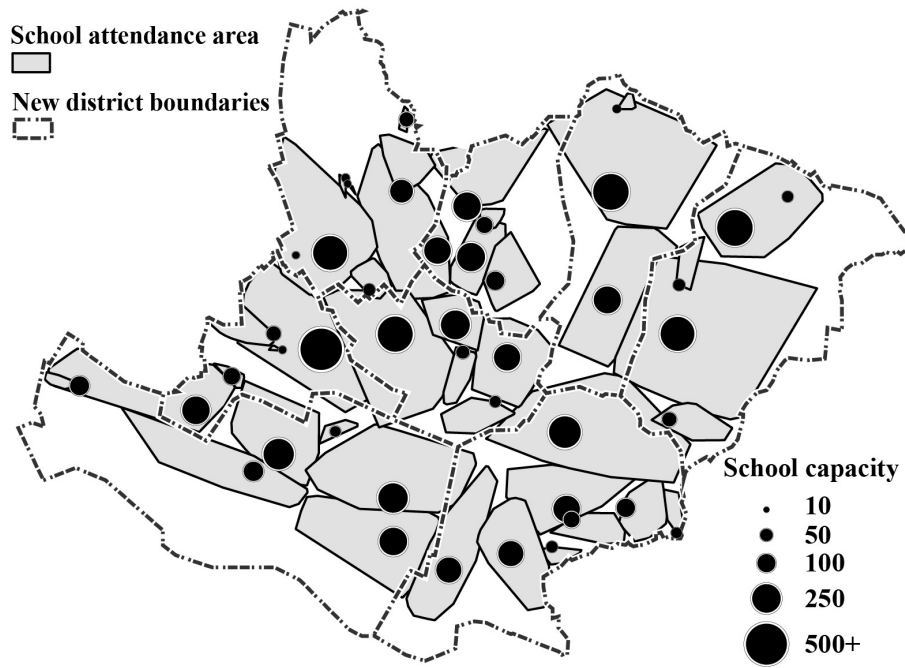
5.2 Modélisation d'enclassement tous niveaux scolaires confondus (1P à 6P)

L'algorithme est ici utilisé pour modéliser l'attribution de 2'887 immeubles (contenant 7'055 élèves) (cercles) à 44 écoles (carrés, fig. 5.5 haut). La cartographie du partitionnement durci z_{ig}^* (eq.3.3) permet de visualiser le groupe d'immeubles associé à chaque bâtiment scolaire. La zone d'attente de chaque école peut être obtenue en générant l'enveloppe convexe de chacun des groupes (5.5 bas). Les enveloppes convexes pouvant se chevaucher, il peut être nécessaire de les retravailler manuellement avant de les agréger pour établir un ou plusieurs scénarios de découpage d'établissements. L'entropie d'attribution est figurée en couche de fond, les valeurs fortes (en foncé) indiquent les endroits de la ville où les élèves peuvent, au besoin, être attribués à une autre école. Ces cas peuvent être donc être utilisés pour remplir ou désengorger des écoles.

Cette démarche tous niveaux confondus assure pour chaque établissement un équilibre entre la population d'élève et la capacité des écoles. Elle a pour but d'établir un ou des découpages de base qui doivent ensuite être comparés aux résultats obtenus en traitant chaque niveau scolaire.



(a)



(b)

FIGURE 5.5 (a) : Cartographie des attributions (z_{ig}^*) et entropie $H(G|i)$
 (b) : Les zones d'attente des écoles (convex hulls) sont regroupées pour créer de nouvelles limites d'établissements.

5.3 Modélisation d'enclassement par niveau scolaire

La figure 5.7 expose les résultats pour chacun des six niveaux (1P-6P). Les n domiciles d'élèves sont représentés par les petits symboles, leur forme et leur teinte indiquent l'appartenance aux m écoles (grand symboles). Les valeurs indiquées sur les écoles relate l'erreur sur les capacités engendrée par le durcissement des appartenances flou ($z_{ig} \rightarrow z_{ig}^*$). Pour une école donnée, une valeur positive indique le nombre de place(s) restante(s), alors qu'une valeur négative dénote le nombre d'élèves attribués en trop (surcharge). Ces erreurs sont de l'ordre de quelques places et sont donc dérisoires au vu des effectifs traités. Pour rééquilibrer les groupes on réattribuera de préférence les élèves situés sur des zones de haute entropie d'attribution ("taches" foncées). Le découpage de base établi à la section est tracé sur chacune des cartes afin de vérifier sa "compatibilité" avec chacun des niveaux scolaires. Cela consiste à vérifier si les immeubles, situés dans un établissement donné, sont attribués à une école d'un autre établissement. Cela se produit par exemple dans la région de Malley (fig.5.6) où des élèves 1P viennent d'un autre établissement alors que d'autres de 5P le quittent.



FIGURE 5.6 Cas d'élèves "transfrontaliers" dans la région de Malley.

L'identification de ces élèves "transfrontaliers" peut se faire informatiquement et ils peuvent être cartographiés (fig. 5.8) sous la forme de flux. Chacun d'eux va d'une zone hachurée (région où résident les élèves) vers une école (carré). La carte combine ici les flux de tous les niveaux scolaires indique si les limites d'établissements conviennent pour tous les niveaux. Si ce n'est pas le cas, des investigations doivent être menées sur les flux les plus importants. Pour améliorer la situation ou réaliser d'autres scénarios d'enclassement, la capacité de ces écoles peut être modulée manuellement.

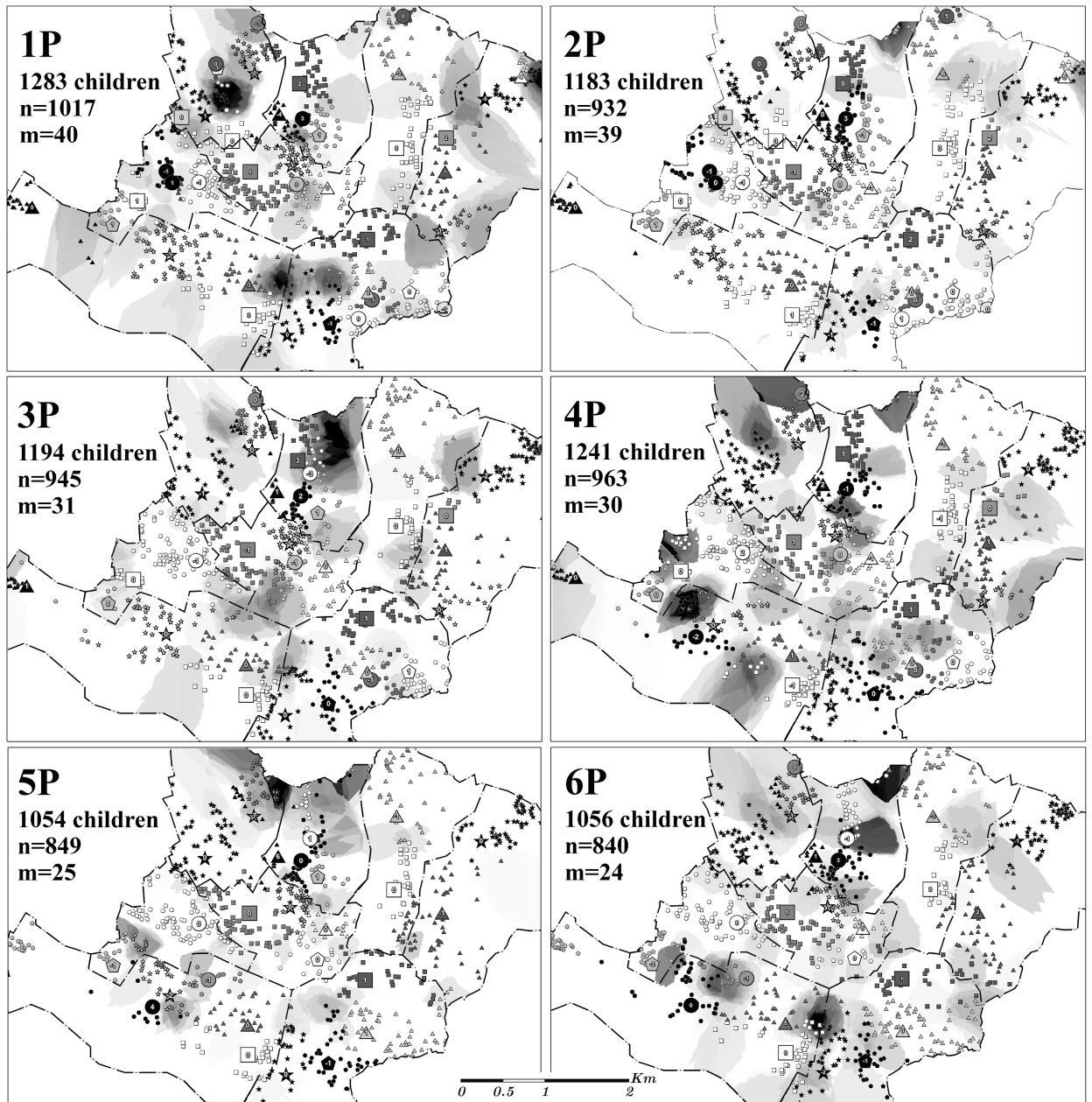


FIGURE 5.7 Cartographie des attributions (z_{ig}^*) pour chaque année scolaire et entropie $H(G|i)$

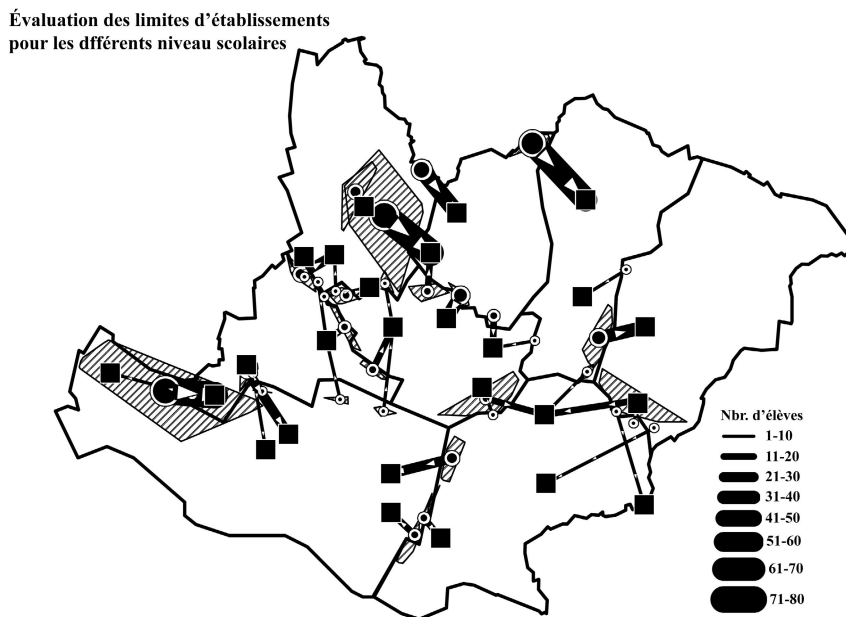


FIGURE 5.8 *Élèves attribués à une école située en dehors de l'établissement où ils habitent.*

5.3.1 Résultats finaux

La dernière étape consiste à évaluer l'équilibre de chaque établissement. Pour ce faire, le nombre d'élèves résidant dans l'établissement est soustrait à la capacité scolaire afin d'évaluer l'équilibre entre les deux. Ainsi une balance négative indique une capacité d'accueil insuffisante au vu de la population résidente, et inversement si elle est positive. La figure 5.9 expose le découpage final. En oscillant entre -23 (Pierrfleur) et +53 (Prélaz), les balances dénotent de légers déséquilibres tout à fait gérables.

En termes de capacité, les valeurs les plus élevées sont situées au Sud de la ville (Floréal, Mon-Repos) avec un peu plus de 1000 places disponibles. Un groupe relativement homogène est constitué par Prélaz (913 pl.), Beaulieu (868 pl.), Chailly (852 pl.) et Entre-Bois (802 pl.). La Sallaz compterait 763 places si les élèves des zones foraines (Vers-chez-les-Blanc, Montblesson) lui étaient rattachés. Dans un avenir proche, les établissements des Plaines-du-Loup, de la Sallaz et de Floréal verront à l'avenir leur nombre d'élèves et leur capacité augmenter suite à la réalisation des quartiers des Plaines-du-Loup (Métamorphose), des Fiches et des Prés-de-Vidy qui seront tous équipés d'infrastructures scolaires. Comme relaté dans le tableau 5.2 (données de mars 2015) l'équilibre des établissements peut également être calculé en prenant compte les niveaux scolaires. On remarquera de légères différences d'effectifs et de capacité d'avec la figure 5.9, les deux documents ayant été produits sur des données scolaires de dates différentes.

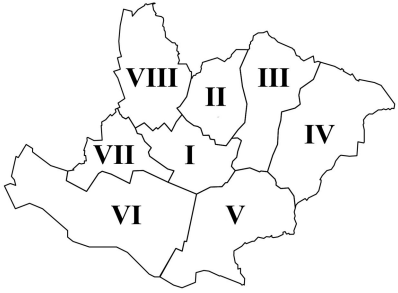
Équilibre entre la capacité des écoles et la population scolaire résidant au sein des établissements				
(1) Nbr. de places / (2) Nbr. d'élèves résidant / Balance : (1)-(2)				
Étab.	1P	2P	3P	
I	188 / 189 / -1	157 / 158 / -1	163 / 150 / 13	
II	175 / 173 / 2	150 / 140 / 10	134 / 127 / 7	
III	119 / 109 / 10	120 / 113 / 7	110 / 109 / 1	
IV	136 / 139 / -3	140 / 135 / 5	169 / 164 / 5	
V	205 / 199 / 6	183 / 186 / -3	208 / 208 / 0	
VI	184 / 186 / -2	179 / 184 / -5	175 / 179 / -4	
VII	157 / 150 / 7	148 / 151 / -3	133 / 140 / -7	
VIII	119 / 138 / -19	106 / 116 / -10	102 / 117 / -15	
Étab.	4P	5P	6P	Total
I	144 / 138 / 6	154 / 146 / 8	124 / 134 / -10	930 / 915 / 15
II	142 / 142 / 0	125 / 120 / 5	134 / 118 / 16	860 / 820 / 40
III	96 / 95 / 1	92 / 98 / -6	81 / 83 / -2	618 / 607 / 11
IV	166 / 166 / 0	129 / 121 / 8	129 / 131 / -2	869 / 856 / 13
V	205 / 198 / 7	167 / 157 / 10	176 / 168 / 8	1144 / 1116 / 28
VI	183 / 188 / -5	161 / 167 / -6	151 / 169 / -18	1033 / 1073 / -40
VII	177 / 175 / 2	136 / 138 / -2	161 / 136 / 25	912 / 890 / 22
VIII	128 / 139 / -11	90 / 107 / -17	100 / 117 / -17	645 / 734 / -89

TABLE 5.1 Équilibre des huit nouveaux établissements primaires par niveau scolaire.

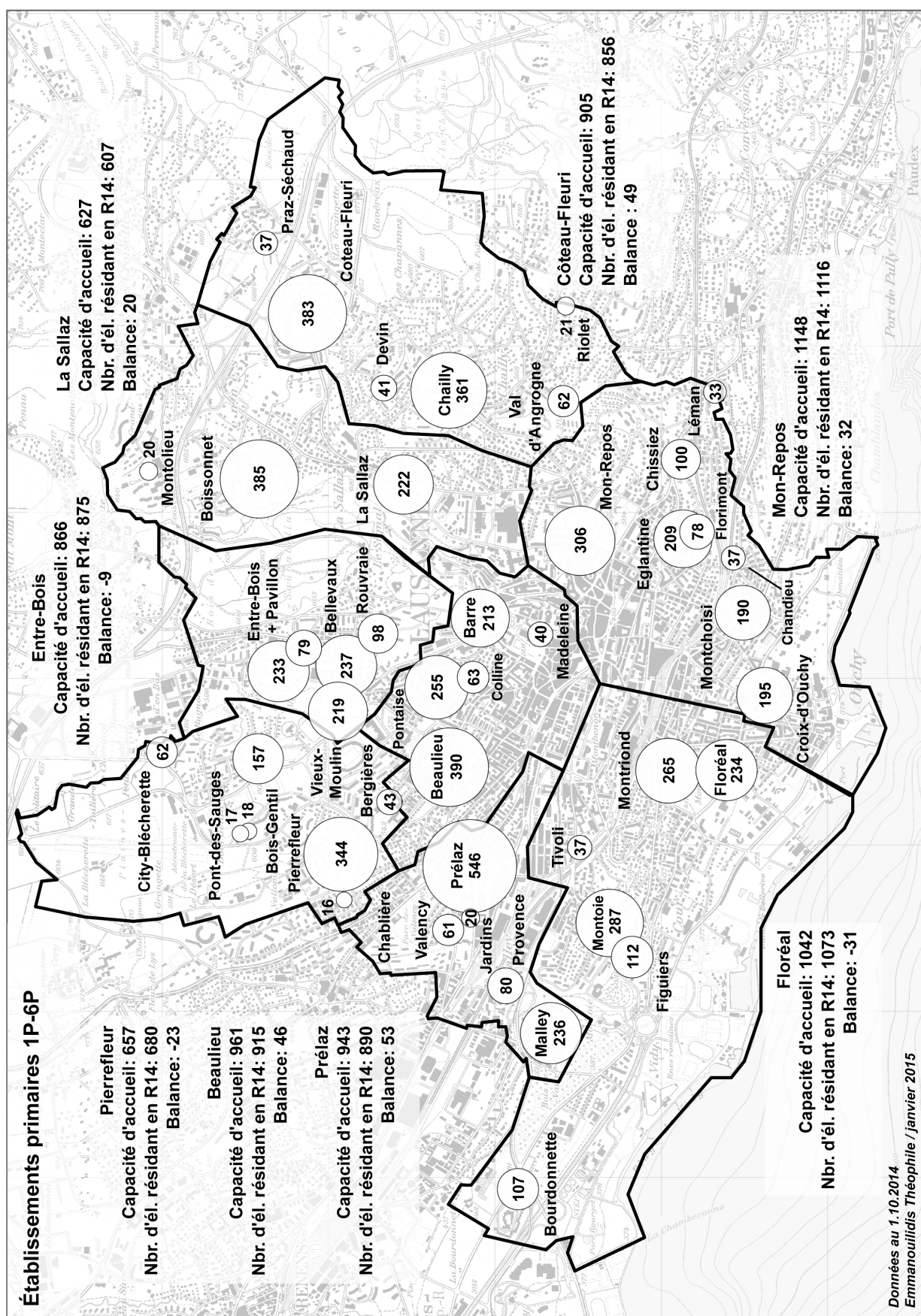


FIGURE 5.9 Nouvelles délimitations des établissements primaire 1P-6P.

5.3.2 Multiplicateurs de Lagrange par niveau scolaire

L'empreinte des multiplicateurs de Lagrange u_i associés aux élèves (équ.3.8) révèle les endroits où la configuration spatiale et la capacité des écoles engendrent une bonne (zones claires) ou une mauvaise (zones foncée) proximité domicile-école. On observe (fig.5.10) que le Sud de la ville tend à offrir aux élèves une bonne proximité pour toute la scolarité 1P-6P. Au niveau 2P se distinguent l'Est et le centre Nord alors que les élèves 3P-4P sont au bénéfice d'une proximité scolaire assez similaire sur l'ensemble de la ville, hormis dans les quartiers périphériques. À l'extrême Ouest, la Bourdonnette dispose d'une école de quartiers permettant d'accueillir la totalité des élèves 1P-2P du quartier, mais seulement une partie des 3P-4P et aucun de 5P-6P qui sont ainsi scolarisés dans des écoles plus lointaines. Cette organisation explique pourquoi cette partie de la ville passe du clair au foncé. Dans le quart Sud-Ouest on remarque une tache allongée sur toutes les cartes. Elle correspond à une région dénuée d'infrastructures scolaires⁷. La teinte des écoles (carré) représente les multiplicateurs de Lagrange v_g associés (équ.3.8). Une valeur élevée (en foncé) indique que les élèves qui la fréquentent viennent de loin et, ou que l'école est très demandée (les élèves situés à proximité sont nombreux) mais n'a pas une capacité suffisante pour satisfaire toutes les demandes.

7. Gare - Georgette - St-François - Flon - Montbenon

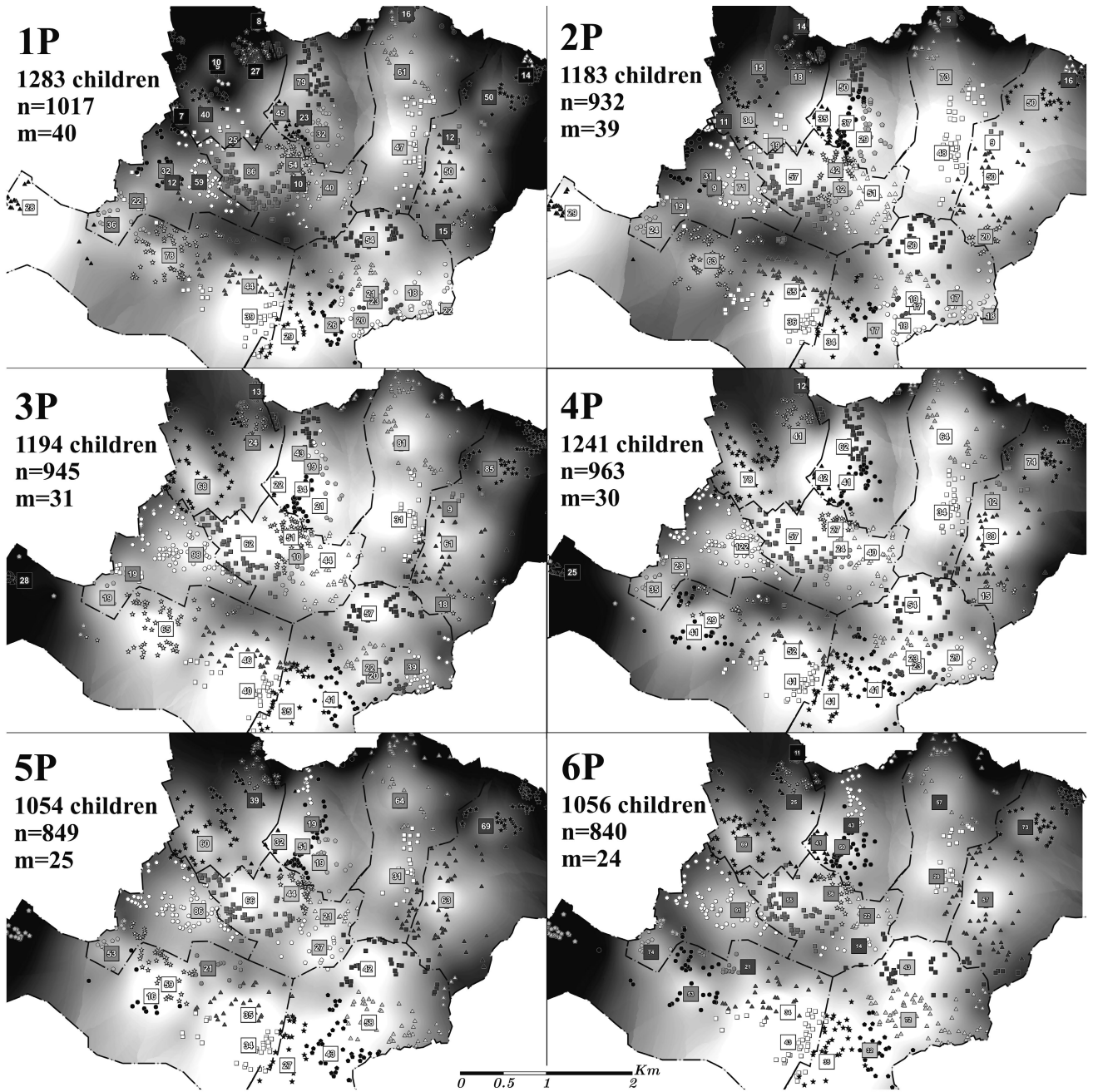


FIGURE 5.10 Multiplicateurs de Lagrange u_i et v_g par niveau scolaire.

5.4 Modélisation et réalité

Cette sous-section propose de comparer les résultats issus de la modélisation avec l'attribution réelle (ou observée) des élèves. Méthodologiquement on comparera entre eux les trois schémas d'attribution suivants :

- Observé : correspond à l'enclassement réel
- CA ("Closest Assignment") : attribution à l'école la plus proche sans considérer la capacité des écoles.
- CCA ("Constrained Closest Assignment") : attribution selon l'algorithme du transport optimal régularisé.

De manière générale (tab.5.2, p.102), les volées de 1P à 4P sont plus peuplées que celles de 5P et 6P et le nombre d'écoles décroît avec le niveau : il y ~40 bâtiments pour les 1P-2P, ~30 pour les 3P-4P et ~25 pour les 5P-6P. On pourrait ainsi s'attendre à ce que la distance moyenne domicile-école (I) soit plus faible pour les niveaux disposant d'un plus grand nombre d'écoles. Cela est vrai (à quelques mètres près) dans les cas du CA (ligne B) et du CCA (ligne C), mais pas pour le cas observé. En effet, on remarque (ligne A) que les distances moyennes des 1P-2P sont quasiment égales, voire supérieures à celles des 3P-4P. Différents phénomènes peuvent expliquer cette situation. Pour les 1P-2P les parents peuvent demander que leur enfant soit accueilli dans n'importe quel bâtiment de la ville (sous réserve de place disponible). Par ailleurs en cas de déménagement l'élève peut terminer son année scolaire à l'endroit où il l'a commencée. Le remplissage des classes consistant à éviter d'ouvrir une classe à moitié vide peut également jouer un rôle. La distance moyenne tous niveaux confondus est d'environ 600 m, soit un trajet à pied d'une dizaine de minutes. Elle serait d'environ 450 m si tous les élèves fréquentaient l'école la plus proche de leur domicile, la valeur associée au CCA est légèrement plus haute (~490 m).

La comparaison entre le schéma d'attribution observé et le CA (II) révèle que 63% des élèves sont scolarisés dans la plus proche école (D) et 81% fréquente la plus proche ou la 2ème plus proche école. Ces taux sont plus bas pour les 1P-2P. En dehors des explications précédentes, on notera que le nombre de bâtiments scolaires et leur proximité respective peuvent également avoir une influence. En effet les structures d'accueil 1P-2P sont plus nombreuses et généralement de petite taille. Elles ont donc tendance à se remplir rapidement, et certains élèves sont de ce fait assignés à une autre école. De plus, certains bâtiments sont spatialement proches, on pense notamment aux couples Montoie-Figuiers, Florimont-Eglantine, Prélaz et les Jardins-de-Prélaz ou encore Entrebois et son pavillon. Fréquenter l'un ou l'autre de ces bâtiments ne change pas grand-chose en termes de distance mais a un impact direct sur les résultats de D. La

	Niveau scolaire	1P	2P	3P	4P	5P	6P	1P à 6P
	Nbr. d'élèves	1283	1183	1194	1241	1054	1056	7011
	Nbr. d'écoles	40	39	31	30	25	24	44
I : Distance domicile-école moyenne (m) / Écart type :								
A	Observé	574/440	610/521	596/455	580/417	643/470	656/482	608/465
B	CA	397/203	390/198	460/225	444/218	511/262	506/275	448/235
C	CCA	447/243	445/250	499/274	470/242	545/282	543/295	489/267
II : Situation observée et plus proche(s) école(s)								
D	% d'él. enclassés dans l'école la plus proche	56.4%	55.0%	68.1%	65.9%	66.1%	69.5%	63.3%
E	% d'él. enclassés dans la plus proche ou 2ème plus proche école	77.6%	75.1%	84.3%	82.3%	83.3%	85.0%	81.1%
III : Correspondance entre les attributions du CCA et celles observées								
F	% d'él. dont le 1er choix d'école du CCA correspond à l'attribution observée	59.2%	59.5%	71.7%	71.2%	68.6%	70.8%	66.7%
G	% d'él. dont le 1er choix ou le 2ème choix d'école du CCA correspondent à l'attribution observée	79.5%	77.6%	86.7%	85.7%	83.2%	88.1%	83.4%
IV : Correspondance entre les attributions du CCA et du CA								
H	% d'él. dont le 1er choix d'école du CCA correspond à l'école la plus proche	73.4%	73.6%	79.3%	83.2%	79.9%	81.5%	78.4%
I	% d'él. dont le 1er choix d'école du CCA correspond à la 1ère ou 2ème plus proche école	90.5%	88.5%	91.1%	93.6%	90.0%	94.0%	91.3%

TABLE 5.2 Table des résultats de la comparaison entre trois schéma d'attribution : observé, CA : attribution à l'école la plus proche sans considérer la capacité des écoles, CCA : attribution selon l'algorithme du transport optimal régularisé.

comparaison avec le CCA (III) On entend par 1er (F) et 2ème choix d'école (G) la première et la 2ème plus haute probabilité d'appartenance z_{ig} . En moyenne ~67% des attributions du CCA correspondent à celles observées (ligne F). Cela signifie la mise-en-pratique du CCA nécessiterait la réaffectation du tiers des écoliers soit environ 2'338 écoliers. Une telle opération concernerait ~40% des 1P-2P et ~30% des 3P-6P.

La dernière partie (IV) du tableau propose de comparer les schémas d'enclassement CCA et CA. On observe qu'environ 78% des attributions du CCA correspondent à la plus proche école. Cela signifie que les 22% restant ne peuvent pas l'être à cause des contraintes de capacité. La distinction par niveau scolaire indique que les 1P-2P sont les plus affectés par ces contraintes (~26%) et les moins concernés sont les 4P (~17%). Si on considère les deux premiers choix d'école du CCA la correspondance des attributions d'avec le CA est globalement supérieure à 90%.

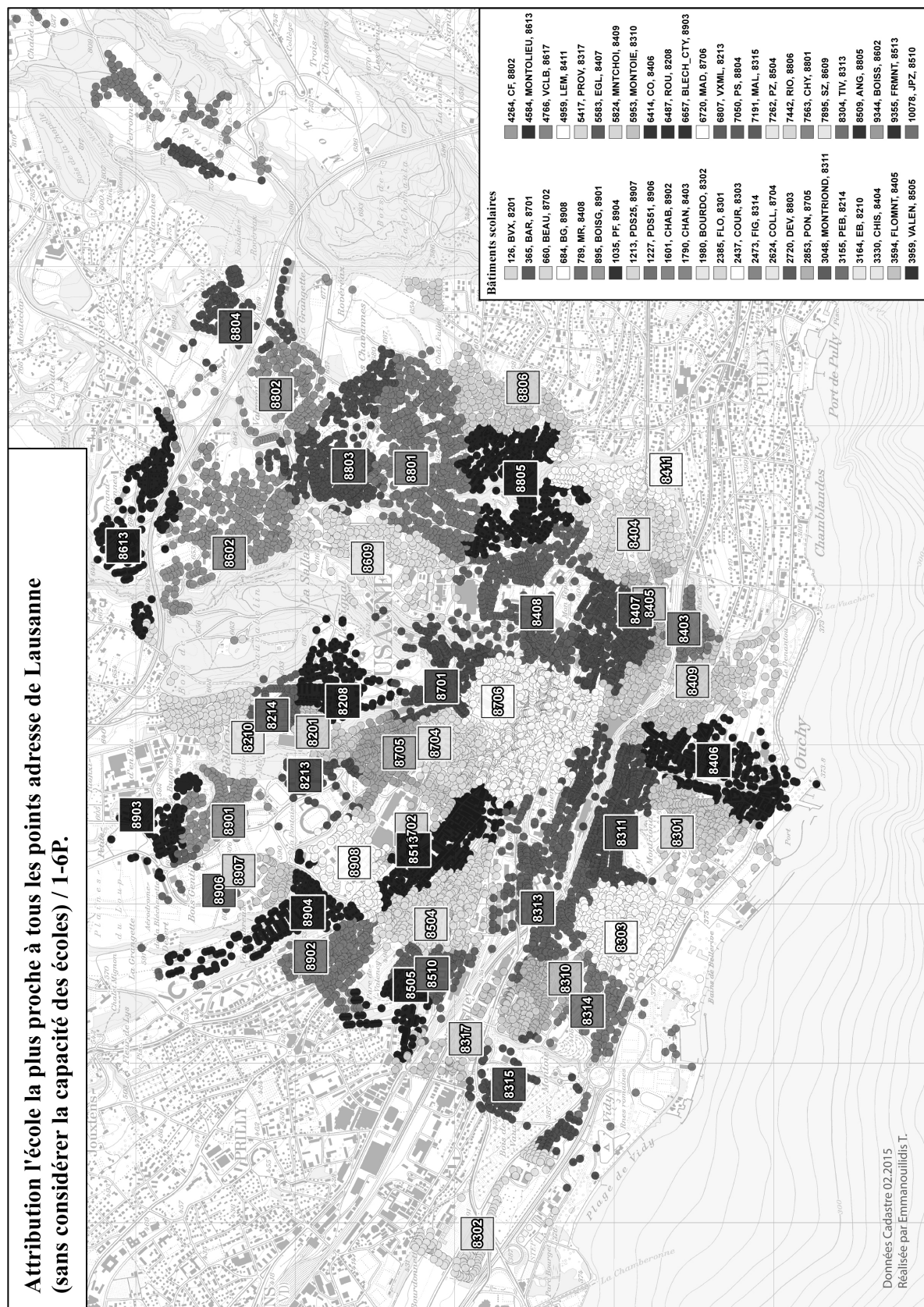
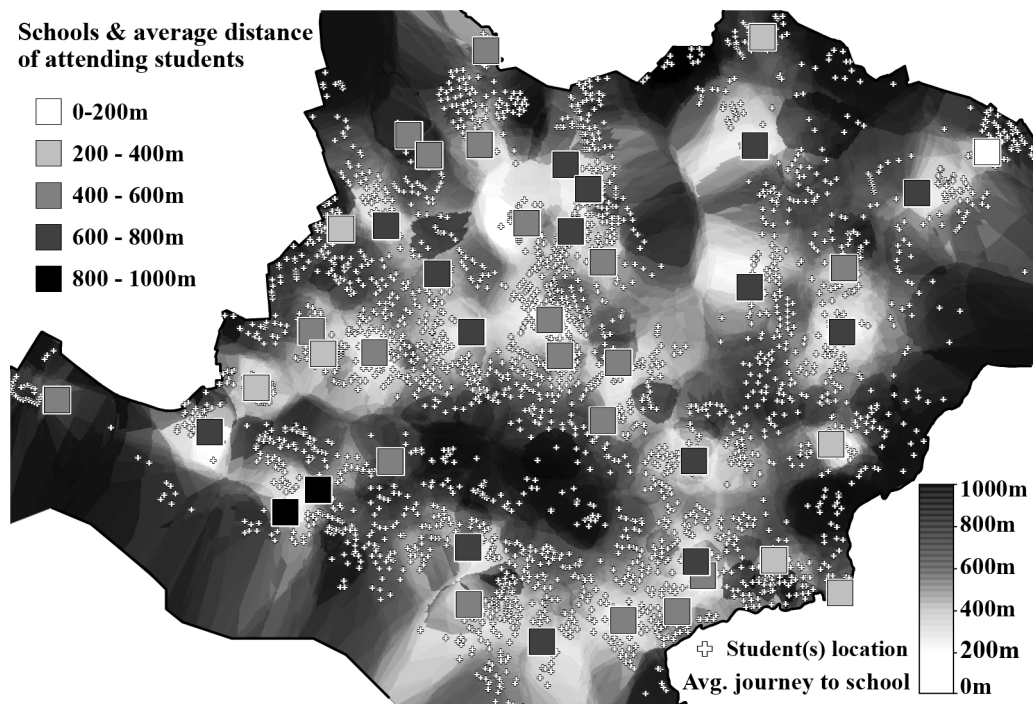


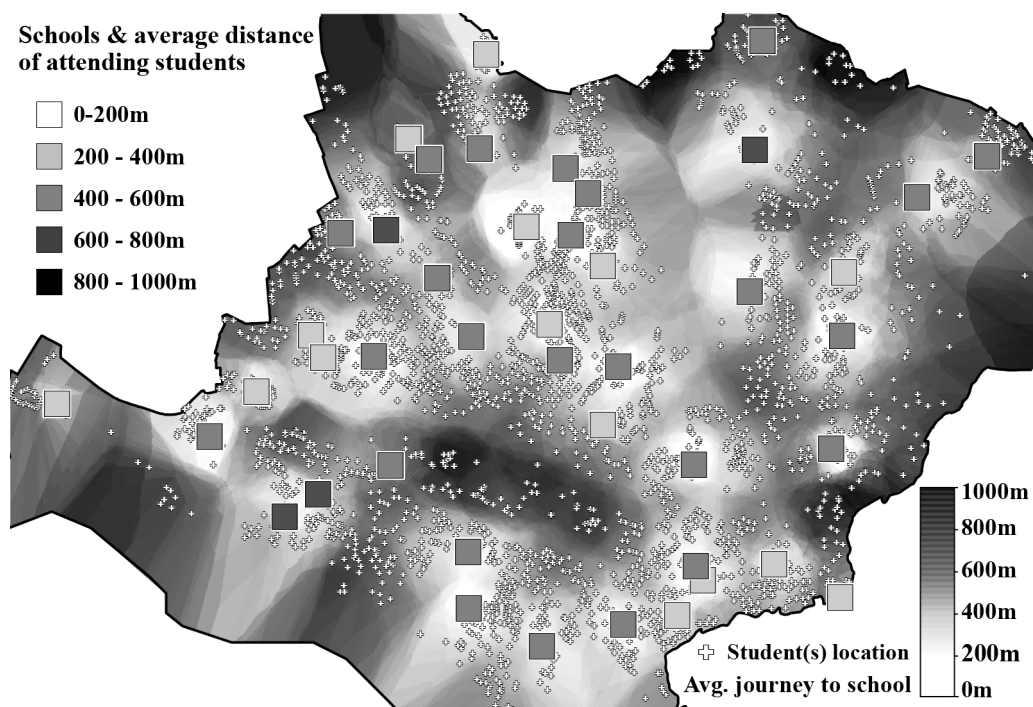
FIGURE 5.11 Attribution des bâtiments de la ville à la plus proche école (“Closest assignment” ou “CA”). Très utile au SEPS, la base de données contient également les 2^{ème} et 3^{ème} plus proches écoles de chaque bâtiment de la ville. Elle est utilisée pour déterminer l'école d'un nouvel élève ou pour équilibrer les classes avant la rentrée.

5.4.1 Proximité de scolarisation

Afin d'évaluer et de visualiser la proximité domicile-école de manière globale, on calcule pour chaque immeuble la distance moyenne des élèves résidant à l'école qui leur a été attribuée (fig.5.12). Un krigeage réalisé sur ces résultats met en avant les zones de la ville disposant en moyenne d'une bonne (en clair) ou d'une mauvaise (foncé) proximité aux structures scolaires. La valeur associée à chaque école (carré) indique la distance moyenne des élèves qui la fréquentent. Les analyses sont basées sur l'enclassement observé (carte a) et sur celui résultant du CCA (carte b) (distinction faite entre les différents niveaux scolaires). La comparaison des deux révèle une nette différence de contraste signifiant que la proximité domicile-école pourrait être améliorée sur l'ensemble de la ville. Le CCA engendre un meilleur continuum des valeurs faibles qui témoigne d'une meilleure équité spatiale. On remarquera toutefois que les valeurs des zones situées en bordure et en plein centre-ville restent élevées dans les deux cas et constituent les régions les plus défavorisées en termes de proximité scolaire 1P-6P.



(a) Distance moyenne domicile-école observée.



(b) Distance moyenne domicile-école selon le CCA

FIGURE 5.12 a : Distance moyenne domicile-école observée
b : Distance moyenne domicile-école selon le CCA

5.4.2 Impact théorique des contraintes de capacité

La comparaison des schémas d'attribution du CCA avec celui du CA permet d'identifier théoriquement les immeubles ne pouvant pas être attribués à la plus proche école à cause des contraintes de capacité (5.13). Le nombre de bâtiments scolaires allant de 40 pour les 1P à 24 pour les 6P, le nombre de cas identifiés est plus important lorsque les écoles sont nombreuses (tab.5.2 ligne H). Globalement les cas mis en avant se situent plutôt dans l'Ouest que dans l'Est. Certains groupes de bâtiments apparaissent sur les six cartes, il s'agit notamment d'immeubles localisés dans les quartiers du trio Blécherette, Bois-Gentil, Maillefer (Nord-Ouest), du couple Montely-Malley (Ouest) ou encore des quartiers de St-Roch et du Valentin au centre-Ville. On remarquera également aux niveaux 1P et 2P les quartiers périphériques du Nord-Est (Isabelle-de-Montolieu, Praz-Séchaud). Ces résultats suggèrent que les écoles situées dans ces quartiers n'ont pas une capacité suffisante pour assurer une proximité scolaire optimale. On remarquera toutefois que la distance domicile-école moyenne 1P-6P du CCA est de 448m alors que celle du CA est de 448m (tab.5.2 lignes B et C). Cela représente une différence d'une quarantaine de mètres, une valeur similaire à celle obtenue au sein des différents niveaux scolaires. Pour visualiser l'impact métrique du fait de ne pas pouvoir trouver de place dans la plus proche école, des cartes analogues à la figure 5.12 pourraient être réalisées.

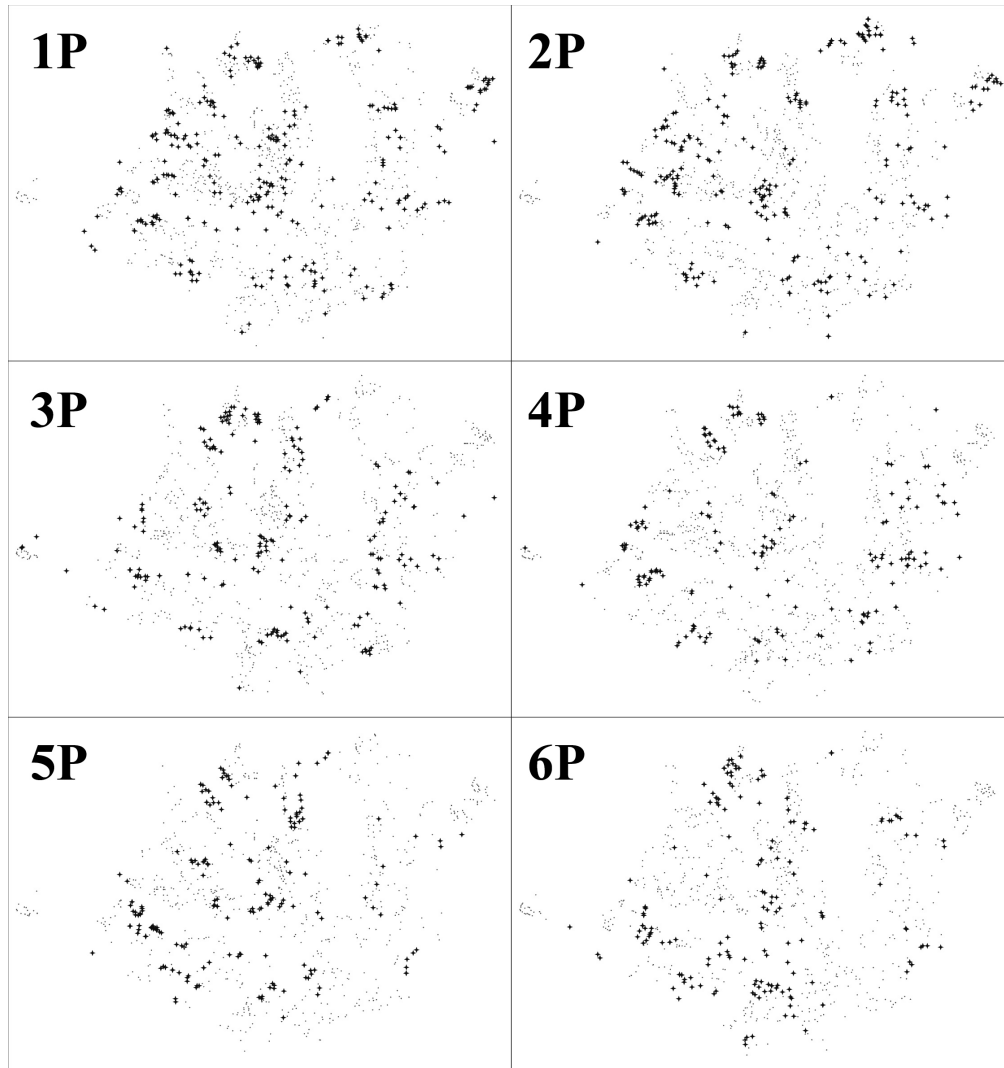


FIGURE 5.13 *Cartographie des domiciles d'élève ne pouvant pas être attribués (étoile) à la plus proche école (comparaison de CCA à CA)*

5.5 Conclusion

Ce chapitre a particulièrement mis l'accent sur la dimension méthodologique et technique du projet. La redéfinition d'établissements scolaires est une opération complexe pouvant avoir des conséquences sur l'ensemble des acteurs et des infrastructures de l'école publique. Réaffecter un grand nombre d'élèves de niveaux différents, c'est par exemple devoir restructurer le corps enseignant, et donc possiblement casser des synergies entre enseignants et toute une organisation interne ayant mis des années à s'établir. D'un point de vue logistique cela implique de possibles transformations de

bâtiments, les besoins en salle pour des élèves de 1P n'étant pas les mêmes que ceux de 6P. C'est également devoir réévaluer les besoins et donc l'infrastructure de l'accueil parascolaire.

Au final, de nos premières réflexions à la concrétisation du projet en 2015, quatre années se sont écoulées. La mise en œuvre très récente du projet ne nous permet pas ici d'en faire le bilan. Dans un futur proche (2016-2017) une étude visant à la création d'un établissement primaire 1P-8P sera lancée. Bien qu'ils n'aient pas été totalement intégrés au sein de l'administration communale, il semble évident que les outils et les méthodes développés durant ce projet seront d'une aide précieuse. On précisera néanmoins que l'algorithme du transport développé vise à une optimisation spatiale favorisant la proximité scolaire. Une proximité qu'il ne faut pas oublier d'interroger du point de vue de la mixité sociale. De plus et au-delà d'un apprentissage "théorique" dispensé par l'enseignement obligatoire, le fait d'aller à l'école est un apprentissage de la ville et des pratiques : le chemin de l'école n'est-il pas une école de vie ? À l'extrême, que serait la vie scolaire si chaque élève pouvait être scolarisé à quelques mètres de son domicile ?

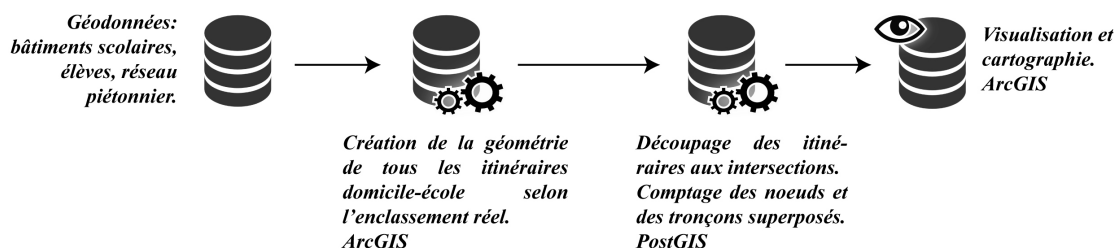
Chapitre 6

Simulation des flux domicile-école

Depuis de nombreuses années le SEPS œuvre pour assurer au mieux la sécurité des enfants sur le chemin de l'école et autour des infrastructures scolaires. On mentionnera par exemple l'organisation des Pédibus, l'aménagement de zones 30km/h ou encore l'installation de ralentisseurs de vitesse aux alentours des écoles. Aux heures d'affluence, de nombreux bénévoles (souvent des retraités) postés aux passages piétons avoisinant les infrastructures scolaires, aident les enfants à traverser. La prévention routière est assurée par la Police qui forme et sensibilise les écoliers aux dangers de la route. Sur le terrain une vingtaine de patrouilleurs scolaires assurent une présence préventive aux abords des collèges.

En 2014, dans le cadre de réflexions conjointes avec le Service des routes et de la mobilité, le SEPS nous a contacté avec l'interrogation suivante : *“Nous serions intéressés de savoir, vu vos travaux sur les réseaux et les chemins suivis par les élèves, si vous avez une « image » ou un document permettant de visualiser là où il y a une forte charge de mobilité ?”*

Ne disposant d'aucune donnée réelle concernant les flux d'écoliers, l'idée est de calculer les flux “théoriques” sur la base des trajets du plus court chemin entre le domicile et l'école. Cela présuppose que les élèves connaissent et empruntent le plus court chemin pour aller à l'école à pied. L'approche proposée est géométrique, elle peut être schématisée comme suit :

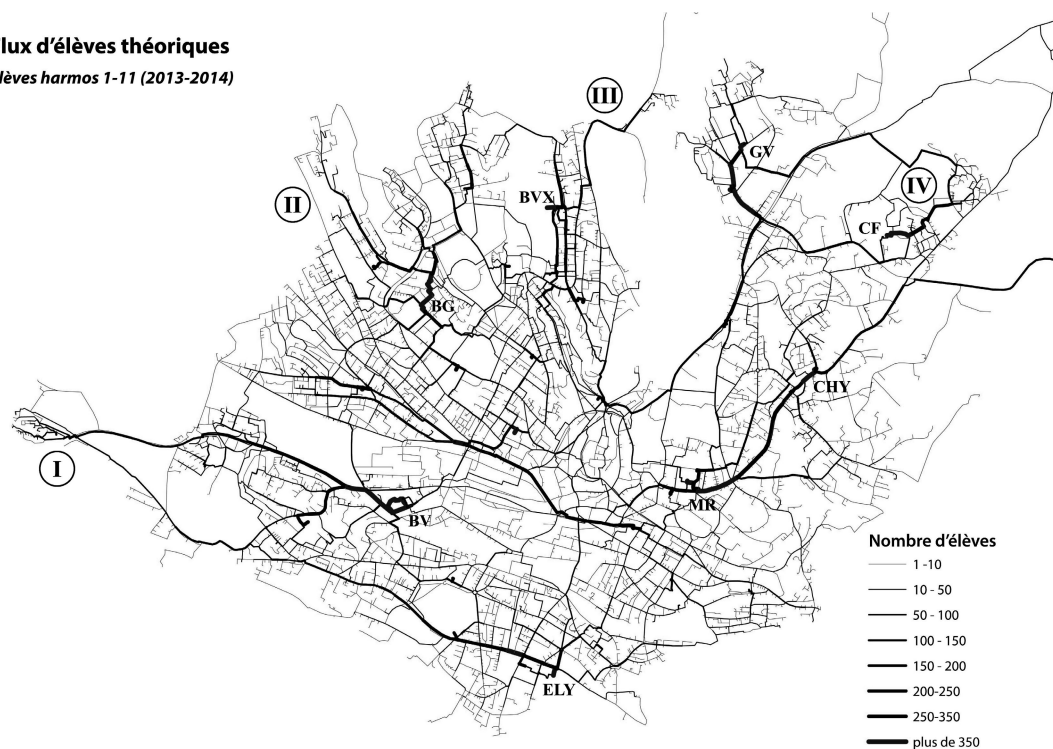


Cette méthode permet de savoir combien d'élèves parcourent en théorie les différentes arêtes du réseau, et également combien transitent aux intersections. La figure expose les résultats obtenus en considérant les itinéraires des 12'245 écoliers (fig.6.1) de l'année 2013-2014. Les flux les plus importants (carte a) se situent en toute logique dans les alentours et au long des routes menant vers les complexes scolaires les plus importants. Il s'agit dans le Sud du collège du Belvédère (BV) et du couple Elysée/Croix-d'Ouchy (ELY). Plus au Nord la liaison Mon-Repos (MR) - Chailly (CHY) est théoriquement très convoitée. Dans les environs des collèges des Bergières (BG), de Bellevaux (BVX), de Boissonnet/Grand-Vennes (GV) et de Coteau-Fleuri (CF) la charge de mobilité est également importante (entre 500 et 900 él.). On notera l'importance des flux des quartiers périphériques à haute densité, avec notamment (d'Ouest en Est) la Bourdonnette (I), le Désert/Pierrefleur (II), la Clochatte (III) et Isabelle-de-Montolieu (au Nord de GV) et Praz-Séchaud (IV). On remarquera dans le quart Nord-Est les élèves venant des exclaves lausannoises (Chalet-à-Gobet, Montblesson, Vers-chez-les-Blanc). La carte (b) illustre le nombre d'élèves transitant par les intersections du réseau. Produit à haute résolution ce type de document permet de visualiser les carrefours et les intersections théoriquement les plus fréquentés.

Dans une perspective piétonne, on peut supposer que les longues distances sont effectuées via l'utilisation d'autres modes de transports publics ou privés. En ce sens, l'évaluation de l'aménagement des routes et des trottoirs reliant les bâtiments scolaires aux arrêts de bus les plus proches serait judicieuse mais n'a pas été réalisée. Les élèves les plus à même d'effectuer les trajets à pied sont sans doute ceux habitant à proximité de leur école. La figure 6.2 propose ainsi de limiter les analyses aux 8'691 élèves dont la distance domicile-école est inférieure à 1 kilomètre. Globalement, on observe que les valeurs les plus fortes sont localisées dans les mêmes endroits qu'à la figure précédente (fig.6.1). La comparaison montre également que les itinéraires inférieurs à 1 km impliquent un nombre d'arêtes plus restreint. Cela est particulièrement visible dans le quart Sud-Ouest et dans l'Est de la ville où de nombreux chemins et routes demeurent infréquentés.

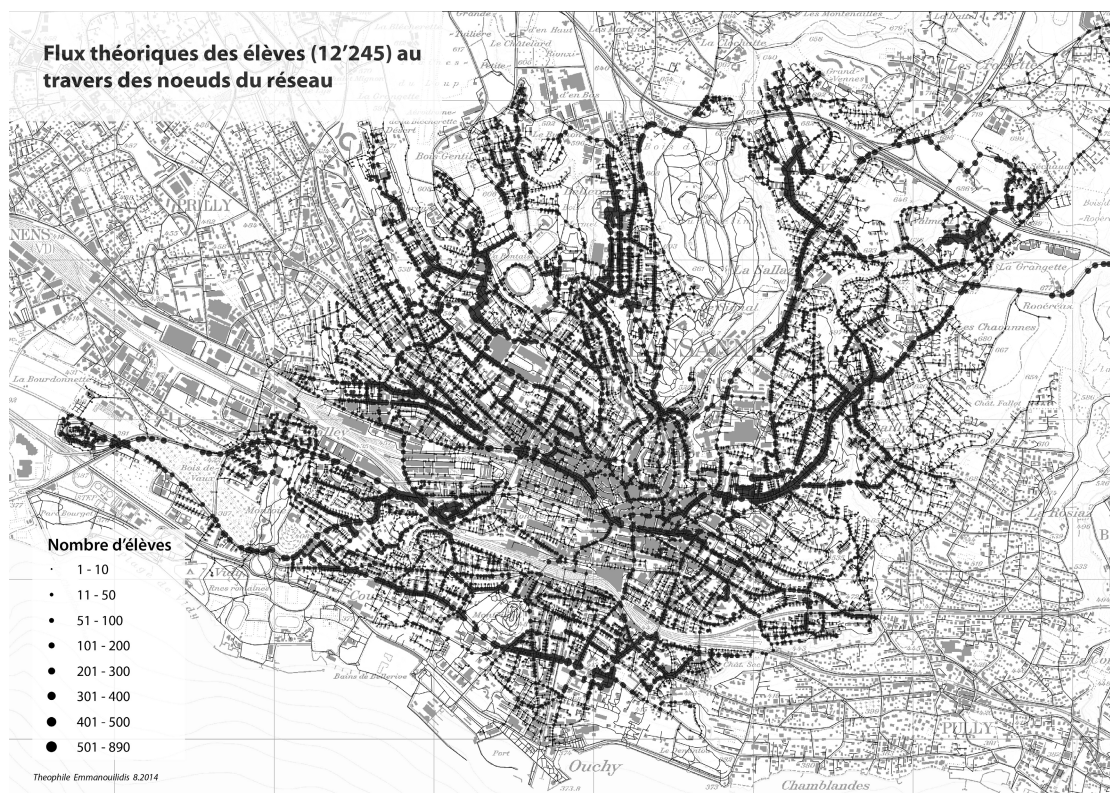
L'étude présentée ici n'aura nécessité que quelques jours de travail. L'administration n'ayant pas donné suite, on en conclura que son intérêt réside plus dans son approche technique et dans son esthétique que dans sa pertinence pratique.

Flux d'élèves théoriques
Elèves harmos 1-11 (2013-2014)



Theophile Emmanouilidis 8.2014

(a)



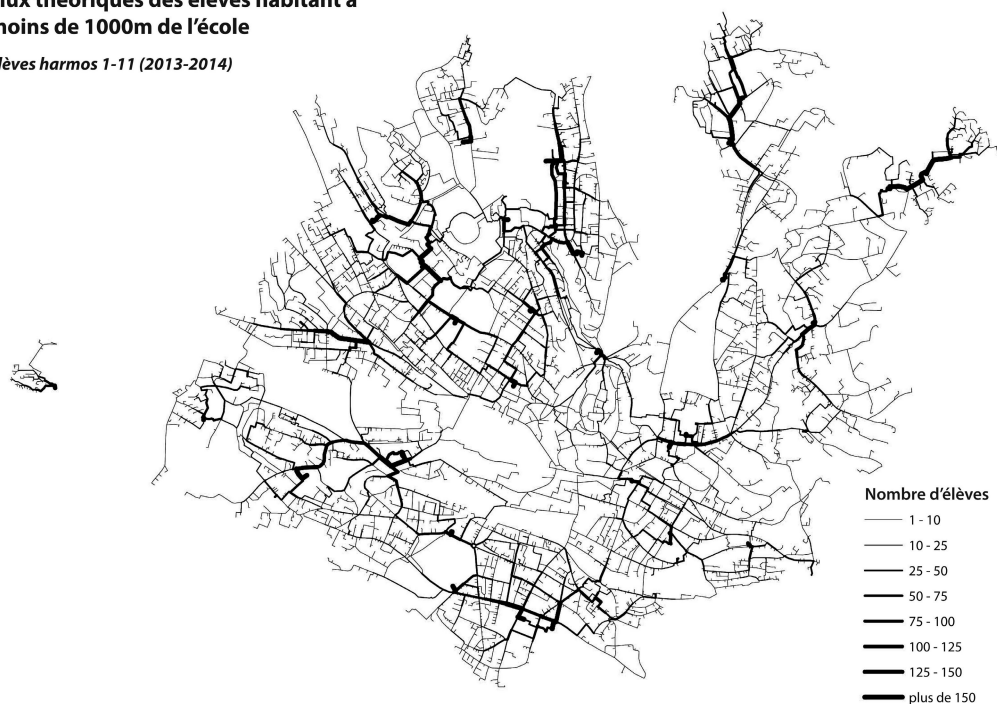
Theophile Emmanouilidis 8.2014

(b)

FIGURE 6.1 Flux théoriques domicile-école de tous les élèves.

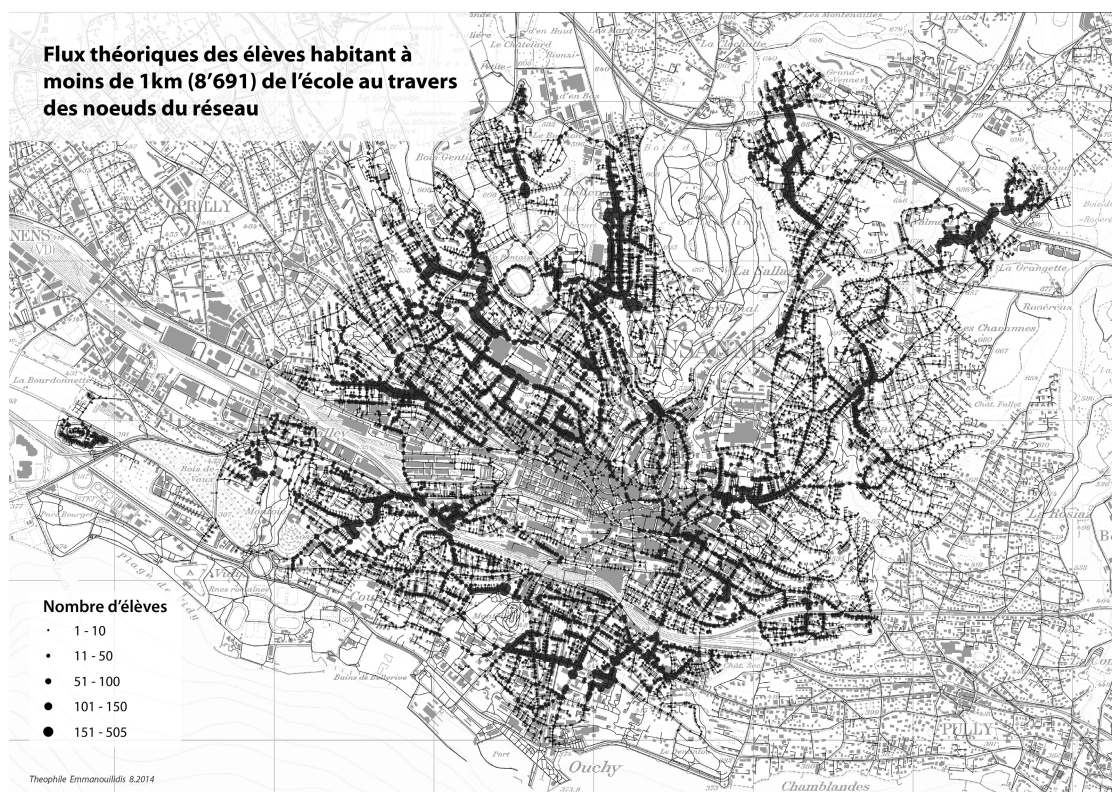
Flux théoriques des élèves habitant à moins de 1000m de l'école

Elèves harms 1-11 (2013-2014)



(a)

Flux théoriques des élèves habitant à moins de 1km (8'691) de l'école au travers des noeuds du réseau



(b)

FIGURE 6.2 Flux théoriques domicile-école des élèves résidant à moins de 1km de l'école.

Chapitre 7

Évaluation de la localisation d'une nouvelle école en périphérie communale.

Les projets ont jusqu'à présent principalement impliqué l'entier du territoire communale, aussi ce dernier chapitre propose de s'en tenir à une échelle plus locale, plus détaillée. Il propose une étude d'impact, dont le rapport est ici reproduit, demandée par le SEPS en 2014. Sans être techniquement complexe, il vise à illustrer à quel point les géodonnées scolaires peuvent constituer une aide à la décision spatiale.

La requalification de l'ancienne zone industrielle du quartier de Malley amènera à la construction d'une nouvelle école à proximité de la limite communale lausannoise. L'enjeu est de savoir si la ville de Lausanne aurait un intérêt à disposer de classes dans le nouveau collège de Malley-Centre. L'approche proposée est structurée comme suit :

- Analyses spatiales du site de la future école : plan de situation, position du site relativement aux infrastructures scolaires et accès aux transports publics environnants.
- Statistiques sur les distances domicile-école des élèves lausannois (par niveau scolaire)
- Délimitation de la zone d'étude et des quartiers lausannois potentiellement concernés par la nouvelle école.
- Dynamique actuelle des élèves habitant ou étant scolarisés dans la zone d'étude.
- Perspectives de l'évolution de la population scolaire au sein de la zone d'étude.

Toutes les distances sont calculées au travers du réseau piétonnier de la ville de Lausanne, et correspondent au plus court chemin piétonnier entre deux lieux (typiquement domicile-école). Sauf mention contraire, les données élèves utilisées datent du 22 août

2013 et représentent donc les volées Harmos 1-6 de 2013-2014.

7.1 Analyses spatiales du site de la future école

Plan de situation

Le nouveau bâtiment scolaire du quartier de « Malley-Centre » sera localisé juste à côté du théâtre Kléber-Méleau. Au niveau des transports publics, l'école se situe environ à 200m à pied de la gare Prilly-Malley, à environ 500m des arrêts de bus de l'av. de Morges et à environ 400m de l'arrêt Malley du M1.

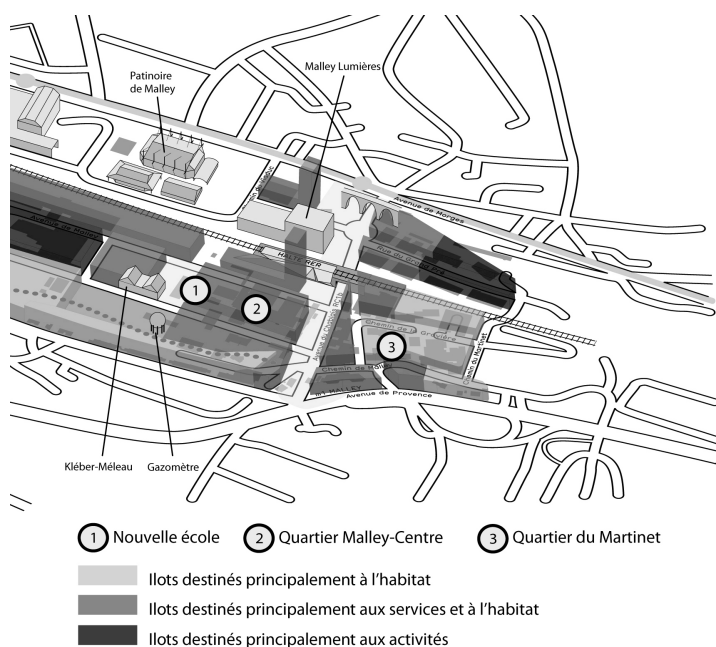


FIGURE 7.1 Plan de situation de la nouvelle école « Malley-Centre » (source : brochure «Malley s'éveille »)

Position relative du futur collège de Malley-Centre

La figure 7.2 illustre les distances du nouveau collège de Malley-Centre avec les autres écoles environnantes. Trois bâtiments (Malley 711m, Provence 756m et Valency 1080m) sont situés dans un « rayon » d'environ 1km. Il est intéressant de voir que les bâtiments de Malley-Centre, Malley et Provence sont à quasi équidistance les uns des autres.

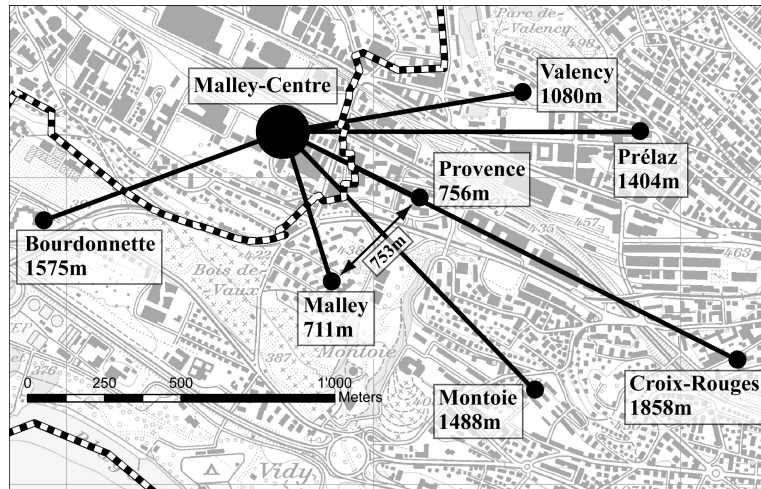


FIGURE 7.2 Carte des distances entre Malley-Centre et les bâtiments scolaires lausannois environnants.

7.2 Statistiques sur les distances domicile-école des élèves lausannois (par niveau scolaire)

Sur l'ensemble de la ville et en considérant les différents niveaux scolaires, la distance moyenne domicile-école oscille entre 604 et 655m (faible variation), alors que la distance médiane oscille entre 473 et 527m. Rappelons que la médiane est plus robuste au sens où elle est moins influencée par des valeurs extrêmes. On notera également qu'il y a environ 20% d'élèves Harmos 1-2 de plus que d'élèves 5-6. Les élèves des 7 et 8ème années habitent en moyenne environ 2 fois plus loin de leur école que ceux de 6ème année et moins.

Niveau	Distance domicile-école Moyenne	Distance domicile-école Médiane	Nombre d'élèves
1P-2P	617m	473m	2'389
3P-4P	604m	495m	2'169
5P-6P	655m	527m	2'007
1P-6P	624m	499m	6'565
7P-8P	1'178m	882m	2'029

TABLE 7.1 Statistiques des distances domicile-école observée par les élèves 1P-8P sur l'ensemble de la ville.

Si l'on considère les mêmes statistiques à l'échelle des bâtiments scolaires environnant Malley-Centre, on s'aperçoit que les distances obtenues sont plus basses que celles calculées à l'échelle de la ville. Les collèges de la Bourdonnette et de Provence sont situés dans des quartiers à forte densité de population. Il en résulte une valeur domicile-école moyenne relativement faible. Le collège de Malley a la capacité scolaire la plus importante. Il a des valeurs plus élevées car il est le seul bâtiment de cette partie de la ville à accueillir des élèves Harmos 5-6.

Bâtiment	Distance domicile-école Moyenne	Distance domicile-école Médiane	Nombre d'élèves
Bourdonnette	393m	242m	138
Malley	666m	649m	238
Provence	297m	215m	81
Valency	437m	460m	76

TABLE 7.2 *Statistiques des distances domicile-école observée par les élèves des écoles situées à proximité du futur site.*

7.3 Délimitation de la zone d'étude et dynamiques existantes

Afin de déterminer la zone d'étude, des polygones de distance centrés sur Malley-Centre ont été générés selon des intervalles de 250 mètres (Figure 3). À noter que le réseau piétonnier de Prilly est incomplet, les résultats ne sont donc pas pertinents en dehors de la limite communale (ligne blanche). Cette approche permet par exemple de voir que les collèges de Malley et de Provence sont situés à un peu moins de 750m à pied de Malley-Centre. Techniquement parlant, cela permet de déterminer spatialement les domiciles des écoliers situés à une certaine distance de Malley-Centre. La détermination de cette distance consiste à définir la distance domicile-école maximale acceptable pour un écolier de niveau Harmos 1-6. Pour accomplir cette tâche, différentes statistiques ont été calculées sur l'ensemble de la ville.

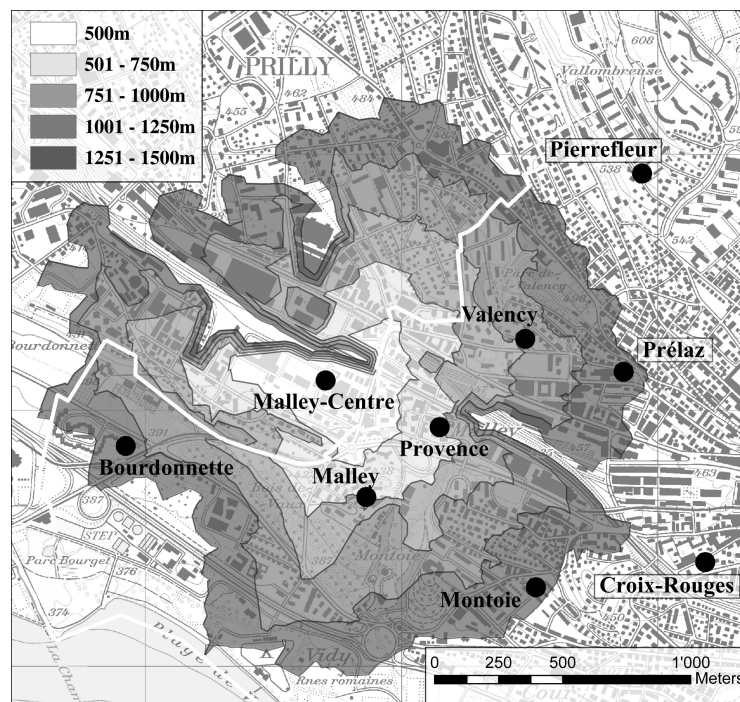


FIGURE 7.3 Polygones de distance centrés sur Malley-Centre (distance de marche maximale $c = \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$)

Ces différents résultats ont permis de définir une zone d'étude basée sur une distance comprise entre 750 et 1000m depuis le futur collège de Malley-Centre (cf. Figure 3, surface jaune). La dynamique existante entre les différents bâtiments scolaires a également joué un rôle dans le tracé de la zone. Au final elle se compose de cinq « quartiers ». La Figure 4 illustre la répartition spatiale des écoles ainsi que la population scolaire résidente. À noter que le nombre de place des bâtiments correspond au nombre d'élèves actuels. Les cinq quartiers sont les suivants :

- Valency-Sud (96 élèves) s'étend du bas de l'av. de Morges jusqu'aux Jardins de Prélaz et comprend également l'av. de la Confrérie. Les effectifs les plus importants sont situés le long de l'av. de Morges.
- Le quartier du Martinet est le plus près du nouveau quartier de Malley-Centre et il est marqué par une forte densité de population. Il contient le collège de Provence.
- Montelly comprend la partie haute du quartier de Montelly ainsi que les habitations de l'av. de Provence.
- Le quartier du Bois-de-Vaux contient le collège de Malley.
- Le quartier de la Bourdonnette a été ajouté à l'étude vu le lien existant avec le collège de Malley.

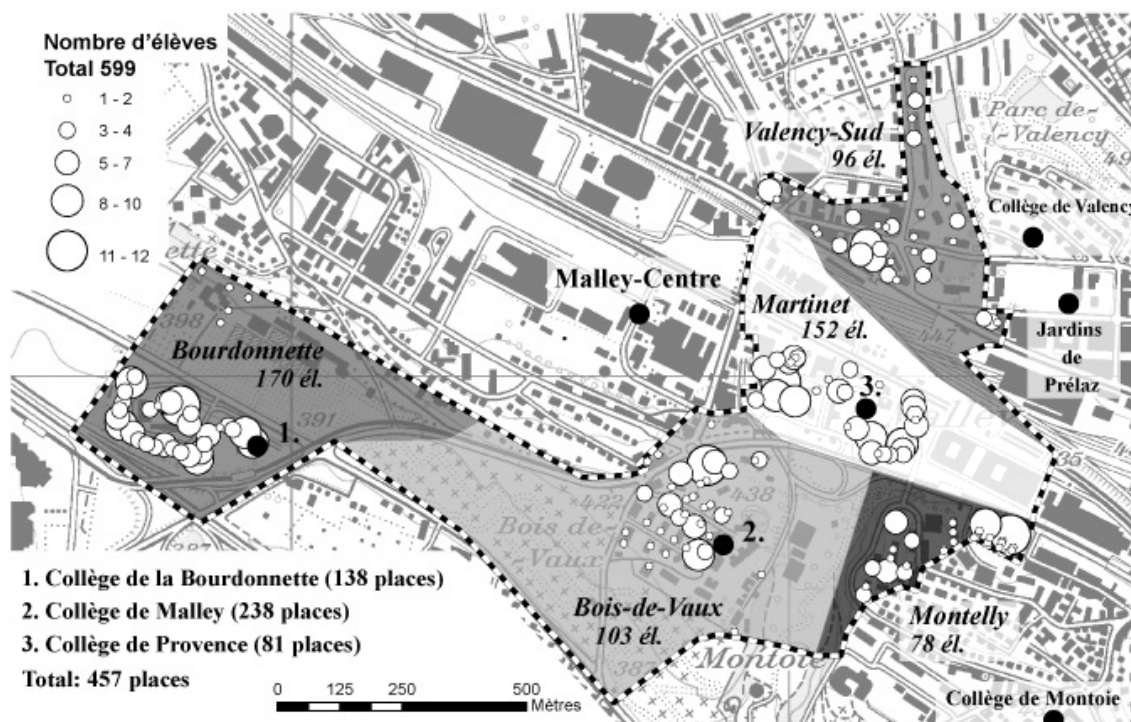


FIGURE 7.4 Zone d'étude et répartition spatiale des élèves 1P-6P.

Les habitations situées à l'intérieur de la zone d'étude ont une distance à Malley-Centre inférieure à 1km. Cela concerne au total 599 écoliers lausannois 1-6. Le quartier de la Bourdonnette est plus lointain. Une trentaine d'élèves (5-6ème année) y habitant se rendent en métro à Malley. Il faut préciser que l'arrêt Malley est situé à 350m du collège du même nom, et le collège de Malley-Centre sera situé à environ 400m. Dans cette optique un lien entre le quartier de la Bourdonnette et la nouvelle école de Malley-Centre est tout à fait envisageable.

92% de la population scolaire (421 élèves pour 457 places) des bâtiments de la Bourdonnette (129 él. pour 138 pl.), de Provence (76 él. sur 81 pl.) et de Malley (216 él. sur 238 pl.) habite à l'intérieur de la zone d'étude. Les 8% restants proviennent principalement du reste du quartier de Montelly et les bas du Chemin du Bois-de-Vaux. La zone d'étude peut ainsi être considérée comme la zone d'affluence ou le bassin de recrutement de ces trois collèges.

Pour illustrer la dynamique existante au sein des quartiers mentionnés une carte des flux principaux a été créée (Figure 5). L'origine de la flèche représente le quartier de résidence des écoliers et la tête indique le bâtiment où ils sont scolarisés.

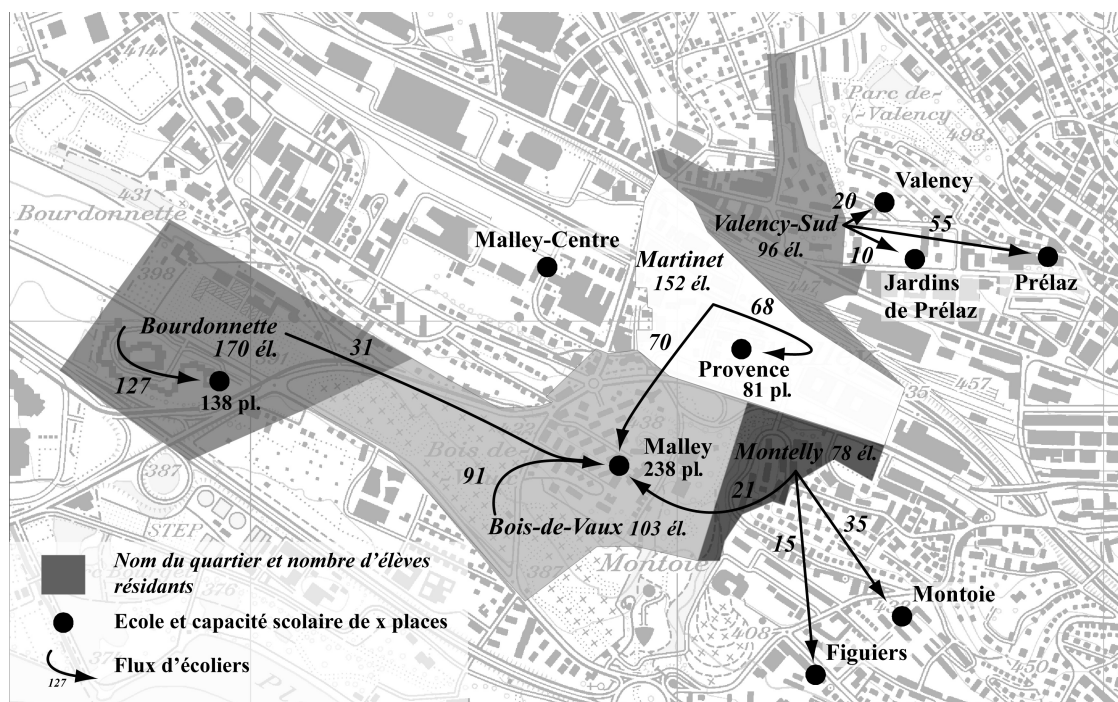


FIGURE 7.5 Flux d'élèves observés au sein de la zone d'étude

On observe : - Le rôle « gravitaire » du collège de Malley qui a la plus grande capacité scolaire et qui est le seul à disposer de classe de 5 et 6ème année. Il accueille ainsi les élèves de ce niveau venant du Martinet et de la Bourdonnette. Il accueille également des élèves du quartier de Montelly, même si ces derniers sont majoritairement envoyés vers les collèges de Montoie et des Figuiers. - Malgré leur proximité, le quartier de Valency-Sud est plutôt tourné vers le quartier de Prélaz, il n'émet que très peu d'élèves en direction des écoles de Malley et de Provence. La majorité des immeubles de ce quartier seront situés à moins de 750m de Malley-Centre.

- À noter que les bâtiments scolaires de Provence, Malley, Bourdonnette et de Valency ne disposent pas de classe 7-8 ni de classes spéciales (ACC/DEP/OES/VER). Les élèves habitant dans la zone d'étude et fréquentant ce type de classe sont respectivement 140 et 22.

7.4 Prévision de la population scolaire jusqu'en 2017 et synthèse

Afin de prévoir l'évolution de la population scolaire le SEPS a fourni un fichier de l'ensemble des jeunes lausannois. Sur cette base, selon la date de naissance et selon les

Bois-de-Vaux	Bourdonnette	Martinet	Montelly	Valency-Sud	Total
Rentrée 2013					
111 18.6%	179 29.9%	152 25.4%	63 10.5%	93 15.6%	598
Rentrée 2014					
119 20.0%	176 29.6%	146 24.6%	60 10.1%	93 15.7%	594
Rentrée 2015					
118 19.5%	177 29.3%	151 25.0%	61 10.1%	98 16.2%	605
Rentrée 2016					
128 21.5%	178 29.9%	135 22.7%	56 9.4%	99 16.6%	596
Rentrée 2017					
124 20.7%	186 31.1%	135 22.5%	54 9.0%	100 16.7%	599

TABLE 7.3 *Prévisions du nombre d'élèves Harmos 1-6 par quartier de la zone d'étude*

dates de l'année scolaire, 9 fichiers de rentrées scolaires ont été créés (de 2008 à 2017). Chacun d'eux contient les élèves rentrant en première année. Les effectifs des rentrées futures peuvent ainsi être obtenus en combinant ces différents fichiers. Par exemple pour la rentrée de 2017, il est possible d'obtenir les effectifs Harmos 1-6 en combinant les fichiers de 2012 à 2017. L'étude repose sur les deux hypothèses suivantes :

- Le parc immobilier est statique (pas de construction ni de destruction de bâtiment)
- La population est statique (pas d'emménagement ni de déménagement)

Eu égard de ces hypothèses, on remarque que dans l'ensemble, le nombre total d'élèves Harmos 1-6 qui habitera au sein de la zone d'étude restera relativement stable. Les populations scolaires de la Bourdonnette, du Bois-de-Vaux et de Valency-Sud montrent une croissance quasi continue, et inversement pour celles de Montelly et du Martinet. Notons toutefois que cela ne représente qu'un faible nombre d'élèves.

Ces quelques éléments laissent à penser que la capacité d'accueil des collèges de la Bourdonnette, de Malley et de Provence sera suffisante. Toutefois, deux remarques importantes :

- Ces résultats devraient être complétés par une analyse plus approfondie des futurs chantiers de ces quartiers (nouvelles constructions, requalification de bâtiments, etc.).
- L'étude a été menée sur une petite partie de la ville située en bordure du territoire. Une étude spatiale plus élargie permettrait de mieux saisir les dynamiques et les liens actuels et futurs entre population et lieu de scolarisation.

Chapitre 8

Conclusion

Par un heureux hasard ce dernier chapitre porte le nombre “8”, il s’agit ainsi de refermer la boucle sur elle-même. Graphiquement composé de deux sphères superposées avec en haut les Idées, l’université et la théorie, et en bas la praxis et la poïésis, l’univers de la Cité.

Les apports académiques

Dotée d’un centre de symétrie, la géométrie du “8” évoque à la fois sinuosité et centralité, deux concepts investis dans la première partie de ce travail. Les recherches effectuées sur le réseau piétonnier lausannois ont amené à la conception d’une méthode pour évaluer la connectivité dudit réseau tout en suggérant la localisation de potentiels raccourcis. Les nombreux indices développés peuvent prendre en considération la population résidente. Ils s’inscrivent dans une perspective de mobilité piétonne en proposant des analyses multi-échelle (distance de marche maximale) applicables au réseau de n’importe quelle ville. Les nombreuses cartes produites offrent des regards nouveaux sur la morphologie urbaine de Lausanne, sur les patterns qui la composent, sur la marchabilité et sur l’accessibilité induites par son réseau. Une approche comparative qui aurait tout à gagner à être appliquée à des problématiques plus ciblées, comme par exemple pour évaluer la marchabilité autour d’infrastructures de transports publics, l’accessibilité aux zones commerciales, ou encore pour établir différents scénarios de connectivité d’un nouveau quartier au réseau existant.

L’algorithme du transport optimal régularisé est original tant par son formalisme que par sa pertinence d’application dans le contexte scolaire. Il n’en demeure pas moins flexible et serait à même de traiter toute problématique spatiale visant à attribuer, en minimisant les coûts de transport, un ensemble d’origines à un ensemble de

destinations dont la capacité (d'accueil, de stockage,...) de chacune est connue. Si dans notre cas ce coût correspond à la distance domicile-école, l'algorithme reste totalement opérationnel avec un coût basé sur un temps de parcours caractéristique des réseaux multimodaux. À ce titre la création du réseau lausannois alliant mobilité piétonne et transports publics ouvrirait d'intéressantes perspectives de recherches académiques. Une autre perspective consistant à intégrer une dimension de mixité sociale à l'algorithme est en cours d'élaboration. Une évolution des géodonnées et des méthodes mathématiques qui auraient tout leur rôle à jouer dans l'organisation scolaire.

Les apports à la Ville de Lausanne et à sa population

La création des géodonnées scolaires aura nécessité la mise en place de synergies durables au sein même de l'administration. Avec un peu de recul, cet investissement aura provoqué un saut qualitatif sans précédent, une petite révolution dans l'organisation, la gestion et la planification scolaire. L'engouement et les nombreux projets qui s'en sont suivis témoignent de besoins latents auxquels peuvent être associées des problématiques multiples. Telles que présentées dans cette thèse, les solutions élaborées pour y répondre constituent une base et une amélioration importante des connaissances et des outils d'aide à la décision spatiale, et ce dans un domaine de gestion dont la complexité est souvent insoupçonnée. La réforme de la politique des transports scolaires et le système de gestion mis en place, a incontestablement eu un impact sur les pratiques urbaines des quelques 9'000 bénéficiaires annuels. Le projet de redéfinition de la carte scolaire a été un double succès. D'une part il a permis la création d'un outil innovant permettant d'attribuer les élèves aux différentes écoles de la ville. Et par là de suggérer des plans de rentrée, ou encore d'évaluer l'impact de changement dans l'organisation spatiale et logistique des infrastructures scolaires (modification de la capacité d'accueil, nouveau bâtiment). D'autre part, l'algorithme a permis, au travers de diverses simulations, de redéfinir les établissements primaires sans que cela ne nécessite de lourdes transformations des infrastructures scolaires, et ne perturbe trop l'organisation préexistante. L'algorithme aura été d'une grande aide dans une période de réforme scolaire bien souvent délicate à mettre en œuvre. Il est fort probable que le SEPS souhaite dans un avenir proche en faire un usage plus soutenu, et ce d'autant plus que le canton ne dispose pas d'un tel outil. Une telle démarche est envisageable, mais elle devrait vraisemblablement faire partie d'un projet plus large de gestion et de visualisation des géodonnées au sein du SEPS. De manière générale il se pose ainsi la question ouverte de la pérennisation des méthodes et données tant au niveau de l'administration communale, de l'université que de la communauté scientifique.

Les apports personnels

D'un point de vue personnel cette thèse a été une aventure enrichissante et constructive par bien des aspects. Elle a été l'occasion de découvrir et de contribuer à une géographie numérique dotée d'un fort potentiel aussi bien académique que pratique. L'informatisation de la géographie n'est pas sans conséquence sur la pratique même de la discipline, elle a indubitablement transformé la façon dont le géographe analyse, dessine et construit le monde. Mis au diapason du rythme effréné de l'informatique, il doit à présent être programmeur, graphiste, gestionnaire de base de données, web-master ou encore installateur système. Les quelques années d'expérience accumulées laissent à penser que les SIG sont un excellent moyen pour rallier le champ théorique de l'analyse spatiale à l'organisation spatiale et administrative d'une ville. Cette démarche met le chercheur dans une position antagoniste où, d'un côté, il doit mener des recherches dont les résultats ne sont pas forcément assurés, alors que de l'autre côté, il doit fournir à l'administration des solutions qui fonctionnent. Ce défi a été pour nous motivant, et il a toujours été guidé par la volonté de satisfaire les deux parties qui se sont d'ailleurs montrées très ouvertes, cordiales et compréhensive de la situation. Les convergences d'agenda entre, par exemple, la soumission d'un article et la mise en œuvre d'un projet ne sont pas toujours évitables. De plus, avec le temps nos recherches ont nécessité un investissement croissant et l'administration nous a de plus en plus sollicité. Ces éléments font que d'une manière générale la temporalité de cette thèse a été compliquée à gérer. Une autre difficulté rencontrée est d'ordre technique. Les logiciels SIG évoluent et s'intègrent au sein d'environnements informatiques différents qui font que l'implémentation d'un algorithme développé à l'université au sein de l'administration communale n'est pas une tâche aisée. Au-delà de ces difficultés, cette collaboration Ville-Université nous aura doté d'une expérience professionnelle et académique ouvrant vers de multiples horizons. Dans tous les cas nous espérons que nos travaux auront su ajouter une goutte d'eau à l'océan de la connaissance, et qu'ils sauront ouvrir la voie à d'autres collaborations bénéfiques aux habitants et usagers de notre chère ville de Lausanne.

Bibliographie

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network flows : theory, algorithms, and applications*. Prentice hall.
- Amaya, J., Peeters, D., Uribe, P., & Valenzuela, J. P. (2015). Optimization modeling for resource allocation in the chilean public education system. *International Regional Science Review*.
- Antunes, A. & Berman, O. (2009). A location model for urban hierarchy planning with population dynamics. *Environment and planning. A*, 41(4), 996.
- Antunes, A. & Peeters, D. (2000). A dynamic optimization model for school network planning. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34(2), 101–120.
- Antunes, A. & Peeters, D. (2001). On solving complex multi-period location models using simulated annealing. *European Journal of Operational Research*, 130(1), 190–201.
- Antunes, A., Seco, A., & Pinto, N. (2003). An accessibility–maximization approach to road network planning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 224–240.
- Barthélemy, M. (2011). Spatial networks. *Physics Reports*, 499(1), 1–101.
- Batty, M. (2005). Network geography : Relations, interactions, scaling and spatial processes in gis. *Re-presenting GIS*, (pp. 149–170).
- Bavaud, F. (2009). Aggregation invariance in general clustering approaches. *Advances in Data Analysis and Classification*, 3(3), 205–225.
- Bavelas, A. (1948). A mathematical model for group structures. *Human organization*, 7(3), 16–30.

- Bavelas, A. (1950). Communication patterns in task-oriented groups. *Journal of the acoustical society of America*.
- Buchmueller, S. & Weidmann, U. (2006). *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*. Institute for Transport Planning and Systems (IVT), Chair of Transport Systems, ETH Zurich.
- Carey, N. (2005). Establishing pedestrian walking speeds. *Portland State University*.
- Caro, F., Shirabe, T., Guignard, M., & Weintraub, A. (2004). School redistricting : Embedding gis tools with integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 55(8), 836–849.
- Chandra, S. & Bharti, A. K. (2013). Speed distribution curves for pedestrians during walking and crossing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 660–667.
- Cover, T. M. & Thomas, J. A. (2012). *Elements of information theory*. John Wiley & Sons.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3).
- Delmelle, E. M., Thill, J.-C., Peeters, D., & Thomas, I. (2014). A multi-period capacitated school location problem with modular equipment and closest assignment considerations. *Journal of Geographical Systems*, 16(3), 263–286.
- Demaine, E. D. & Zadimoghaddam, M. (2010). Minimizing the diameter of a network using shortcut edges. (pp. 420–431).
- Dill, J. (2004). Measuring network connectivity for bicycling and walking. In *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*.
- Duives, D. C., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2013). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation research part C : emerging technologies*, 37, 193–209.
- Emmanouilidis, T. (2013). Urban network analysis. centrality, sinuosity and shortcut detection. *Revue Internationale de Géomatique*, 23(3-4), 431–443.
- Erath, A., Löchl, M., & Axhausen, K. W. (2009). Graph-theoretical analysis of the swiss road and railway networks over time. *Networks and Spatial Economics*, 9(3), 379–400.

- Erlander, S. & Stewart, N. (1990). *The Gravity Model in Transportation Analysis : Theory and Extensions*. Topics in Transportation. Taylor & Francis.
- Fotheringham, A. & O’Kelly, M. (1989). *Spatial Interaction Models :Formulations and Applications*. Ispra Courses on Remote Sensing. Springer.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, (pp. 35–41).
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215–239.
- Giles-Corti, B., Wood, G., Pikora, T., Learnihan, V., Bulsara, M., Van Niel, K., Timperio, A., McCormack, G., & Villanueva, K. (2011). School site and the potential to walk to school : The impact of street connectivity and traffic exposure in school neighborhoods. *Health & place*, 17(2), 545–550.
- Guex, G., Emmanouilidis, T., & Bavaud, F. (2016). Transportation clustering : a regularized version of the optimal transportation problem. *Submitted for publication*.
- Gupta, A. & Pundir, N. (2015). Pedestrian flow characteristics studies : A review. *Transport Reviews*, (ahead-of-print), 1–21.
- Hess, P. M. (1997). Measures of connectivity streets : Old paradigm, new investment. *Places*, 11(2).
- Hillier, B., Leaman, A., Stansall, P., & Bedford, M. (1976). Space syntax. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 3(2), 147–185.
- Ivan Castillo-Lopez, H. A. L.-O. (2015). School location and capacity modification considering the existence of externalities in students school choice. *Computers & Industrial Engineering*, 80, 284–294.
- Kantorovich, L. V. (1942). On the translocation of masses. 37, 199–201.
- Knight, P. L. & Marshall, W. E. (2014). The metrics of street network connectivity : their inconsistencies. *Journal of Urbanism : International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, (pp. 1–19).
- Koh, P. & Wong, Y. (2013). Influence of infrastructural compatibility factors on walking and cycling route choices. *Journal of Environmental Psychology*, 36, 202–213.

- Latora, V. & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19).
- Latora, V. & Marchiori, M. (2002). Is the boston subway a small-world network? *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 314(1), 109–113.
- Latora, V. & Marchiori, M. (2007). A measure of centrality based on network efficiency. *New Journal of Physics*, 9(6), 188.
- Leslie, E., Coffee, N., Frank, L., Owen, N., Bauman, A., & Hugo, G. (2007). Walkability of local communities : using geographic information systems to objectively assess relevant environmental attributes. *Health & place*, 13(1), 111–122.
- Levinson, D. & El-Geneidy, A. (2009). The minimum circuitry frontier and the journey to work. *Regional science and urban economics*, 39(6), 732–738.
- Louf, R. & Barthélemy, M. (2014). A typology of street patterns. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(101).
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of nature*, volume 173. Macmillan.
- Marshall, S. (2004). *Streets and patterns*. Routledge.
- Marshall, S. (2005). Urban pattern specification. *Institute of Community Studies, London*.
- Marshall, W. & Garrick, N. (2010). Effect of street network design on walking and biking. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2198), 103–115.
- Marshall, W. E. & Garrick, N. W. (2011). Does street network design affect traffic safety? *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 769–781.
- Mermet, E. (2011). Aide à l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport : conception d'un modèle pour l'analyse, la visualisation et l'exploration d'un réseau de transport.
- Meyerson, A. & Tagiku, B. (2009). Minimizing average shortest path distances via shortcut edge addition. (pp. 272–285).
- Monge, G. (1781). *Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais*. De l'Imprimerie Royale.

- Montufar, J., Arango, J., Porter, M., & Nakagawa, S. (2015). Pedestrians' normal walking speed and speed when crossing a street. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*.
- Murphy, B., Levinson, D., Owen, A., et al. (2015). *Accessibility and Centrality Based Estimation of Urban Pedestrian Activity 2*. Technical report.
- Newell, G. (1980). *Traffic Flow on Transportation Networks*. MIT Press series in transportation studies. MIT Press.
- Nordbeck, S. (1964). Computing distances in road nets. 12(1), 207–220.
- O'Sullivan, S. & Morrall, J. (1996). Walking distances to and from light-rail transit stations. *Transportation research record : journal of the transportation research board*, 1538(1), 19–26.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets : a primal approach. *Environment and Planning B : planning and design*, 33(5), 705–725.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2008). Multiple centrality assessment in parma : a network analysis of paths and open spaces. *urban design International*, 13(1), 41–50.
- Porta, S., Latora, V., Wang, F., Strano, E., Cardillo, A., Scellato, S., Iacoviello, V., & Messori, R. (2009). Street centrality and densities of retail and services in bologna, italy. *Environment and Planning B : Planning and design*, 36(3), 450–465.
- Porta, S., Romice, O., Maxwell, J. A., Russell, P., & Baird, D. (2014). Alterations in scale : patterns of change in main street networks across time and space. *Urban Studies*, 51(16), 3383–3400.
- Rudloff, C., Matyus, T., Seer, S., & Bauer, D. (2011). Can walking behavior be predicted? analysis of calibration and fit of pedestrian models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2264), 101–109.
- Sabidussi, G. (1966). The centrality index of a graph. *Psychometrika*, 31(4), 581–603.
- Sevtsuk, A. & Mekonnen, M. (2012). Urban network analysis. Retrieved September, 20, 2012.

- Shimbel, A. (1953). Structural parameters of communication networks. *The bulletin of mathematical biophysics*, 15(4), 501–507.
- Siksna, A. (1997). The effects of block size and form in north american and australian city centres. *Urban Morphology*, 1(1), 19–33.
- Sun, J., Walters, M., Svensson, N., & Lloyd, D. (1996). The influence of surface slope on human gait characteristics : a study of urban pedestrians walking on an inclined surface. *Ergonomics*, 39(4), 677–692.
- Sundquist, K., Eriksson, U., Kawakami, N., Skog, L., Ohlsson, H., & Arvidsson, D. (2011). Neighborhood walkability, physical activity, and walking behavior : the swedish neighborhood and physical activity (snap) study. *Social science & medicine*, 72(8), 1266–1273.
- Travençolo, B. & Costa, L. d. F. (2008). Accessibility in complex networks. *Physics Letters A*, 373(1), 89–95.
- Twarogowska, M., Goatin, P., & Duvinneau, R. (2014). Comparative study of macroscopic pedestrian models. *Transportation Research Procedia*, 2, 477–485.
- Villani, C. (2008). *Optimal transport : old and new*, volume 338. Springer Science & Business Media.
- Vragović, I., Louis, E., & Díaz-Guilera, A. (2005). Efficiency of informational transfer in regular and complex networks. *Physical Review E*, 71(3), 036122.
- Wang, F., Antipova, A., & Porta, S. (2011). Street centrality and land use intensity in baton rouge, louisiana. *Journal of Transport Geography*, 19(2), 285–293.
- Watts, D. J. & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of small-world networks. *nature*, 393(6684), 440–442.
- Werberich, B. R., Pretto, C. O., & Cybis, H. B. B. (2014). Pedestrian route choice model based on friction forces. *Simulation*.
- Wilson, A. G. (1969). The use of entropy maximising models, in the theory of trip distribution, mode split and route split. *Journal of Transport Economics and Policy*, (pp. 108–126).
- Winston, W. L. & Goldberg, J. B. (2004). *Operations research : applications and algorithms*, volume 3. Duxbury press Boston.

-
- Witlox, F. (2007). Evaluating the reliability of reported distance data in urban travel behaviour analysis. *Journal of Transport Geography*, 15(3), 172–183.

Publications, conférences et rapports à la Ville

Conférences

- Swiss Geosciences Meeting (2013), Université de Lausanne.
Présentation orale: *Méthodologie et outils pour la planification d'établissements scolaires.*
- 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems (2012), LATSIS, EPFL, Lausanne.
Présentation orale: *Analysis of the pedestrian network of Lausanne: eccentricity, accessibility and partitioning.*
- The 15th AGILE International Conference on Geographic Information Science (2012), Université d'Avignon.
Présentation orale: *Improving the connectivity of a pedestrian network through Euclidean and shortest path distances comparison.*

Publications

- *The transformed optimal transportation problem: sensitivity and segregation of the children-to-school constrained assignment in Lausanne* (2016), T. Emmanouilidis, G.Guex, F. Bavaud, en préparation.
- *Enseignement et territoires: Délimitation d'aires de recrutement scolaire en milieu urbain* (2016), Revue Belge de Géographie, T.Emmanouilidis, G.Dyens, en préparation.
- *Transportation clustering: a regularized version of the optimal transportation problem* (2016), G.Guex, T. Emmanouilidis, F. Bavaud, en cours de publication.
- *Urban network analysis. Centrality, sinuosity and shortcut detection* (2013), T. Emmanouilidis, International Journal of Geomatics and Spatial Analysis, Volume 23/3-4, pp.431-443.

- *Improving the connectivity of a pedestrian network through Euclidean and shortest path distances comparison* (2012). T.Emmanouilidis, Proceedings of the 15th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Avignon.

Rapports au Service des écoles primaires et secondaires de la ville de Lausanne

- *Vérification des résultats d'attributions de subventions de transports publics pour les élèves lausannois* (07.2015, rédigé chaque année en juillet depuis 2010).
- *Étude spatiale du futur collège de Maillefer* (06.2015).
- *Affinage des futurs établissements scolaires primaires 1P-6P* (03.2015).
- *Étude sur le nouveau collège de Malley-Centre* (01.2015).
- *Simulation d'enclassement des futurs nouveaux élèves 1P de la rentrée 2015* (12.2014).
- *Planification des effectifs scolaires à l'horizon 2018* (12.2014).
- *Simulation de scénarios d'établissements Harmos 1P-8P et 9S-11S* (11.2014).
- *Flux théoriques des écoliers lausannois* (8.2014).
- *Scénario visant la délimitation de 8 établissements primaires Harmos 1-6* (09.2013).
- *Étude des établissements scolaires primaires lausannois* (01.2011).
- *Transport scolaire : Scénarios pour la mise en place d'un nouveau système d'attribution d'abonnements de bus pour les écoliers lausannois* (04.2008). *Scénarios complémentaires* (05.2008).

Annexes

Descriptif

Annexes A et B

Les deux premières annexes (A, p.139, et B, p.153) ont pour but d'apporter des informations plus approfondies sur le projet de refonte de la politique des transports scolaires (chap.A, p.139), et sur celui de redéfinition des établissements scolaires (chap.5, p.84). Elles sont constituées des préavis municipaux rédigés par G.Dyens qui permettent de les replacer dans un contexte plus large tout en y apportant d'autres aspects, notamment économiques, politiques et historiques. Des dimensions peu, voire non exposées dans le texte central.

Annexes C à E

Les annexes C (p.167) - D (p.173) - E (p.181) correspondent à différents rapports réalisés pour le SEPS dans le cadre de la redéfinition des établissements. Elles constituent en quelques sorte l'historique de l'application de l'algorithme de transport optimal régularisé. Ces documents sont ici reproduits tels que transmis aux services administratifs concernés.

Appendix A

Nouvelle politique en matière de transports scolaires et d'encouragement des jeunes de moins de 20 ans à l'utilisation des transports publics (G.Dyens 2009)

Nouvelle politique en matière de transports scolaires et d'encouragement des jeunes de moins de 20 ans à l'utilisation des transports publics

Projet de refonte des principes et du mode d'attribution des abonnements TL aux élèves de la scolarité obligatoire
Réponse au postulat Grégoire Junod intitulé "Des transports publics gratuits pour les enfants et les jeunes de moins de 20 ans"

Rapport-préavis n° 2009/16

Lausanne, le 1^{er} avril 2009

Monsieur le président, Mesdames, Messieurs,

1. Objet du préavis

Le présent préavis propose une refonte complète du mode d'attribution et de gestion des abonnements de bus pour les écoliers des établissements de la scolarité obligatoire à Lausanne. Alors que les critères d'attribution d'abonnements gratuits sont encore fondés sur un ancien règlement cantonal datant d'avant la mise en œuvre d'EtaCom, la Municipalité entend définir une nouvelle politique de transports des écoliers dans un domaine qui est désormais de la compétence des communes. Elle entend également inscrire ces nouvelles modalités dans un double contexte plus large, celui de la mobilité, de la sécurité voire de la santé des enfants en milieu urbain, et celui d'un accompagnement des jeunes dans la transition vers l'utilisation des transports publics plutôt que vers les déplacements en voiture individuelle. A cet effet, la Municipalité sollicite une augmentation du budget annuel relatif aux transports scolaires et de jeunes de Fr. 2'046'000.—.

2. Bref rappel

Jusqu'à la mise en place d'EtaCom, la loi scolaire prévoyait l'octroi de la gratuité des transports pour tout élève scolarisé à plus de 2,5 km de son lieu de domicile. La prise en charge des frais de transports était alors assumée au 2/3 par l'Etat, lui donnant ainsi plus de latitude dans l'organisation scolaire, en particulier en milieu rural, où ont été organisés, dès la fin des années 60, de nombreux regroupements scolaires. A ce jour, le règlement cantonal est curieusement toujours en vigueur mais ne correspond plus au nouvel article 114 de la loi scolaire voté en décembre 1999, qui répartit clairement les charges scolaires entre canton et communes. De fait, les communes auxquelles incombe désormais, depuis l'entrée en

vigueur d'EtatCom, la totalité des frais de transports scolaires, ont toute latitude pour leur organisation, pour autant qu'elles permettent en priorité l'application du principe fondamental de la gratuité de l'école publique. Par ailleurs, il faut rappeler que les frais de transports des jeunes en scolarité postobligatoire ne font l'objet d'aucun soutien financier ni mesure incitative, hormis les tarifs particuliers pour les étudiants et apprentis.

La Municipalité est donc d'autant plus fondée à proposer de nouvelles modalités d'octroi des abonnements TL pour les écoliers qu'elle considère de longue date que la distance fixée uniformément pour l'ensemble du canton à 2,5 km n'est pas adaptée au milieu urbain: elle contraint des familles à financer elles-mêmes les transports et oblige l'administration à multiplier les dérogations à la règle avec tous les risques de disparité et d'inégalité de traitement que cela peut impliquer.

D'autres priorités dans la gestion scolaire de ces dernières années ainsi que la nécessité d'une étude préalable pour la mise en place d'un outil informatique performant et d'un projet de nouvelles modalités de gestion de l'attribution des abonnements de bus ont retardé la refonte souhaitable de la politique lausannoise en matière de transports scolaires. Le dépôt de la motion demandant la gratuité des transports pour les jeunes a fourni l'occasion de lancer le projet présenté ci-dessous.

3. Un outil informatique et une étude

En charge du dossier des transports scolaires, le service des écoles primaires et secondaires a examiné différentes pistes de création d'outils nécessaires au calcul des distances et à la gestion de l'attribution des attestations donnant droit à des abonnements TL gratuits. Une étroite collaboration avec le SOI et le service du cadastre a abouti au choix d'un logiciel de calcul des distances. Conçu au départ pour les distances d'une adresse à une autre par voie routière, ce logiciel a été adapté et complété par le relevé des cheminements piétonniers sur l'ensemble de la ville. Cet important travail, qui a requis une étude détaillée de la cartographie puis un déplacement in situ dans tous les lieux nécessitant une vérification, notamment au niveau de l'accessibilité et de la sécurité, a permis de numériser la totalité des cheminements piétonniers en ville de Lausanne. Indispensable pour la mesure des trajets des écoliers, ces données seront d'ailleurs également utiles à d'autres fins et accessibles à terme au grand public par le biais d'Internet.

Sur la base des données recueillies par cet outil informatique, une étude détaillée a été réalisée. Elle a notamment permis d'évaluer différents scénarios, d'en calculer les coûts et de fixer les principes et les bases de calcul d'une révision complète du système d'attribution et de distribution des abonnements Mobilis pour les écoliers lausannois.

4. Résultats de l'étude et principes retenus

4.1. Situation actuelle

Il est important de préciser que, dans la situation actuelle, soit sur la base d'une attribution d'abonnements gratuits lorsque la distance domicile-école est supérieure à 2,5 km, environ 700 élèves secondaires et 130 élèves primaires ont droit à un abonnement gratuit. Les premiers représentent environ 12 % du total des élèves secondaires et les seconds moins de 2 % des élèves primaires. Moins de 7 % de la totalité des élèves bénéficient donc de la gratuité des transports. La différence entre le primaire et le secondaire est liée à l'organisation scolaire du territoire, basée sur le principe de la proximité jusqu'à la fin du primaire (44 bâtiments répartis sur tout le territoire) et sur le regroupement des élèves secondaires (soit dès la 5^e année) dans 7 établissements représentant en tout 11 complexes ou sites scolaires. Il faut relever de plus que la majorité des élèves primaires habitant à plus de 2,5 km sont des élèves regroupés dans des classes

de pédagogie compensatoire ou suivant des cours de français intensif. Ils ne sont pas attribués à ces classes en fonction de la distance, mais pour des raisons pédagogiques.

Jusqu'à ce jour, les données du calcul de la distance de 2,5 km s'appuient sur le recueil systématique des mesures effectuées depuis de longues années à l'aide d'un curvimètre. Mais au fil des années et des difficultés à justifier des différences de traitement sur la base d'une distance fixe, les "limites" ont été adaptées aux réalités du terrain. On évite ainsi, par exemple, des différences de traitement dans un même immeuble ou dans un îlot de bâtiments contigus. Quelques quartiers entiers, par exemple la Bourdonnette ou Praz-Séchaud, dérogent même entièrement à la limite "officielle" des 2,5 km.

Mais une telle situation n'est de toutes façons pas défendable sur le long terme, et la mise en oeuvre de nouveaux critères doit être effectuée sur les bases les plus cohérentes et les plus transparentes possible.

4.2. Résultats globaux de l'étude

Le premier objectif de l'étude était de disposer d'une vision générale de la situation en matière de distance entre les domiciles et les lieux de scolarisation. Les résultats globaux de la partie quantitative de l'étude peuvent être résumés en un seul tableau :

	Nombre		Cumulatif	
0-250 m	951	7.9 %	951	7.9 %
251-500 m	3'278	27.1 %	4'229	34.9 %
501-750 m	2'394	19.8 %	6'623	54.7 %
751-1000 m	1'873	15.5 %	8'496	70.2 %
1001-1250 m	1'046	8.6 %	9'542	78.8 %
1251-1500 m	621	5.1 %	10'163	84.0 %
1501-1750 m	521	4.3 %	10'684	88.3 %
1751-2000 m	405	3.3 %	11'089	91.6 %
2001-2250 m	221	1.8 %	11'310	93.4 %
2251-2500 m	137	1.1 %	11'447	94.6 %
2501 et +	658	5.4 %	12'105	100.0 %
	12'105	100 %		

Tableau 1 : Elèves des écoles lausannoises selon la distance domicile - école par intervalles de 250 m, rentrée 2008

Le premier constat est que, sur les 12'105 élèves primaires et secondaires des écoles lausannoises inscrits au moment de l'extraction du fichier, 8'496, soit 70 %, se trouvaient à moins de 1 km de leur bâtiment scolaire. 10'163 écoliers, soit près de 84 %, étaient domiciliés à moins de 1,5 km de leur école. On peut évaluer la durée des trajets depuis la distance limite¹ à une fourchette de l'ordre de 15 à 20 minutes à pied pour la première distance et entre 25 et 35 minutes pour un trajet de 1,5 km.

Ces données vont servir naturellement de base de calcul des distances, à la détermination de nouveaux critères d'attribution ainsi qu'au calcul des coûts des différents scénarios possibles. Mais il convient d'abord de fixer quelques principes pour la recherche d'une solution satisfaisante.

¹ La "traduction" de la distance en durée de trajet s'effectue en prenant compte également de la topographie: cet aspect est repris dans le point suivant du présent préavis.

4.3. Les principes retenus

L'étude réalisée ne s'est pas bornée à recueillir des éléments chiffrés destinés en priorité au calcul des coûts des différents scénarios possibles. Elle a permis également de dégager un certain nombre de principes servant de cadre aux critères et aux modalités d'attribution des abonnements Mobilis. Les principes retenus sont les suivants :

- 1) le premier principe fondant les critères d'octroi d'un abonnement Mobilis est bien évidemment la diminution importante de la distance donnant droit à la gratuité des transports. La distance retenue à ce jour sur la base de l'ancien règlement cantonal représente un trajet théorique quotidien de 10 km à pied par jour pour les élèves rentrant à domicile à midi. Une telle distance est irréaliste, surtout en milieu urbain et dans une ville au relief accidenté. La conséquence est que de très nombreux parents doivent financer un ou plusieurs abonnements de leur poche. La dépense ainsi imposée contrevient peu ou prou au principe de la gratuité de l'école et pose des problèmes aux familles en difficultés financières;
- 2) l'abaissement de la distance doit s'accompagner de la mise en place de nouveaux critères d'octroi des abonnements. Ces critères doivent revêtir un caractère moins rigide que la simple mesure d'une distance fixe et "arithmétique" entre le domicile et l'école. Ils doivent être les plus lisibles et compréhensibles possibles, éviter d'apparaître comme arbitraires et susceptibles d'être modifiés par des corrections relevant par exemple de modifications de la base de données du logiciel de calcul;
- 3) dans le cadre de la mise en oeuvre et dans celui de la communication aux usagers, il convient de compléter et de moduler les critères d'attribution et les données de distances par d'autres paramètres et, notamment par :
 - la "traduction" de la distance en durée de trajet;
 - la prise en compte, à cet effet, de la topographie de la ville;
 - la prise en compte des "obstacles", des difficultés du parcours (feux de circulation, carrefours difficiles) ainsi que de la sécurité du cheminement, notamment en hiver;
- 4) l'âge et le degré scolaire doivent être pris en compte dans les critères d'attribution. Il faut par exemple tenir compte du fait que les enfants de moins de 6 ans bénéficient de la gratuité des transports et que jusqu'à 16 ans, lorsqu'ils sont accompagnés de leurs parents, ils bénéficient de la gratuité, au moyen de l'acquisition d'une carte junior au prix annuel de Fr. 20.—;
- 5) l'existence des structures d'accueil de jour doit également être prise en compte. Il faut en effet considérer que, comme pour la mise en classe des élèves, c'est "l'adresse de midi" et non l'adresse du domicile qui sert de référence pour le calcul des distances pour les élèves des classes primaires;
- 6) l'ensemble de cette nouvelle politique des transports scolaires doit comprendre une démarche résolue d'encouragement, pour les élèves ne bénéficiant pas de la gratuité des transports, d'effectuer ces trajets à pied;
- 7) une mesure globale d'encouragement à l'utilisation des transports publics doit être imaginée, par l'octroi d'un bon de transports pouvant être obtenu par tous les élèves et les jeunes ne répondant pas aux critères d'octroi d'un abonnement pour se rendre à l'école dans un établissement lausannois de la scolarité obligatoire. Cette mesure prend aussi en compte le fait que les enfants et adolescents seront incités à prendre les transports publics pour leurs activités sportives ou de loisirs.

5. Le scénario proposé

Après examen des différents scénarios possibles et évaluation des coûts, la Municipalité a décidé de proposer de fixer à 1 km la distance permettant l'attribution d'un abonnement annuel gratuit aux écoliers des établissements lausannois, et cela sur la base des considérations suivantes :

- cet élargissement de l'octroi d'une attestation donnant droit à un abonnement représente un signe fort d'une priorité et d'un encouragement à l'usage des transports publics. En déplaçant la limite de 2,5 à 1 km, on fait passer le nombre de bénéficiaires de 1'000 à 3'000 élèves. Ces élèves pourront ainsi également faire usage de leur abonnement pour d'autres activités culturelles, sportives ou de loisirs;
- la durée maximum du cheminement piétonnier ainsi défini est de l'ordre de 15 à 20 minutes deux ou quatre fois par jour. Cette distance est de nature à rendre crédible une démarche visant à inciter les élèves n'ayant pas droit à la gratuité à effectuer ce trajet à pied et à favoriser ainsi une mobilité journalière bénéfique à la santé;
- au-delà de la distance ainsi établie, la Municipalité considère que l'octroi d'un abonnement gratuit à des enfants appelés à se rendre à l'école par les transports publics permet de respecter le principe constitutionnel de la gratuité de l'école publique.

Pour les élèves des établissements scolaires lausannois n'ayant pas droit à l'abonnement de bus pour se rendre à l'école et, afin de faire bénéficier l'ensemble des enfants et des jeunes de la ville d'une mesure d'encouragement à l'usage des transports publics, un bon de transports leur sera adressé, permettant une réduction de 50 % du prix d'achat d'un abonnement annuel Mobilis. Cette mesure permet également de diminuer les conséquences d'une forme particulière "d'effet de seuil" qui verrait, à quelques dizaines de mètres près, une famille recevoir un abonnement et une autre famille, ayant par exemple plusieurs enfants et des moyens financiers limités, amenée à assumer la totalité des charges de transports.

La Municipalité espère également qu'une importante augmentation des possibilités de transports pour les écoliers, ainsi qu'une augmentation du nombre d'élèves prenant l'habitude de se rendre à pied à l'école aura, à des moments précis de la journée, un double effet de diminution de la circulation générée par les parents amenant leur enfant en voiture à l'école et d'amélioration de la sécurité des enfants aux abords des bâtiments scolaires en raison du même phénomène.

La Municipalité espère enfin que, aussi bien l'augmentation de l'utilisation des transports que l'encouragement à effectuer le trajet à pied pour celles et ceux qui habitent à moins d'un kilomètre comprennent une dimension éducative: meilleure connaissance du réseau des transports et de leur ville en général pour les uns et meilleure connaissance de leur quartier pour les autres, sans parler de l'apprentissage de l'autonomie pour les jeunes élèves.

6. Les modalités de gestion

6.1. Le critère de l'âge des enfants

Outre la distance entre le domicile et l'école, le critère de l'âge des élèves doit être pris en compte dans l'attribution des abonnements de bus.

En effet, pour les élèves du cycle initial et du premier cycle primaire, non seulement à peine 11 % d'entre eux habitent à plus de 1 km de leur lieu de scolarisation, mais leur autonomie est encore limitée et la grande majorité des parents ne souhaitent pas qu'ils prennent le bus sans accompagnement. D'autre part,

dans de nombreux quartiers, le réseau Pédibus offre un moyen très approprié et sécurisé d'accompagnement par des adultes. Il faut relever encore qu'en moyenne environ 45 % des élèves primaires fréquentent les structures d'accueil de jour, qui sont systématiquement situées à proximité des écoles, et les élèves sont accompagnés par le personnel des UAPE² ou des APEMS³ pour les plus jeunes des élèves primaires. Dernier élément: les enfants de moins de 6 ans voyagent gratuitement s'ils sont accompagnés d'un adulte détenteur d'un titre de transport valable. De 6 à 16 ans, ils peuvent bénéficier de la carte junior (Fr. 20.— par enfant et par année), qui leur permet de voyager gratuitement s'ils sont accompagnés par un de leurs parents. Il ne convient donc pas d'attribuer d'abonnement aux enfants des classes enfantines et des deux premières années de la scolarité.

Pour les élèves de 3^e et 4^e année, dont environ 15 % habitent au-delà de 1 km, une distribution systématique à tous les ayants droit en fonction de la distance ne paraît pas souhaitable. En dehors des situations particulières de déplacements liées à des questions d'orientation vers des classes de pédagogie compensatoire, qui sont toujours discutées avec les parents, notamment parce qu'elles nécessitent parfois des déplacements, la responsabilité devrait en effet être laissée aux parents des ayants droit d'effectuer les démarches nécessaires à l'obtention de l'abonnement. Il faut relever d'autre part qu'une proportion croissante d'élèves, qui peut dépasser 50 % selon les quartiers et les jours de la semaine, bénéficie d'une prise en charge à midi. Ils ne font donc le trajet domicile-école que deux fois par jour, puisque les APEMS sont situés à proximité des bâtiments scolaires.

Dès le début du cycle de transition, soit dès la 5^e année, le regroupement des élèves dans des collèges ou des centres scolaires secondaires implique souvent des déplacements plus longs et on peut considérer que l'autonomie des enfants, qui sont presque tous âgés d'au moins dix ans, est suffisante pour qu'ils puissent avoir droit à l'abonnement s'ils répondent au critère de la distance. Ces derniers recevront donc, selon les modalités existantes, une attestation leur permettant de bénéficier d'un abonnement Mobilis.

6.2. Détermination des limites et conditions d'octroi des abonnements

Grâce à l'outil informatique mis au point, il est aisé de déterminer quels domiciles sont situés à plus de 1 km de n'importe quel bâtiment scolaire. Mais l'expérience et le bon sens montrent que le seul critère de la distance appliqué à l'aveugle, outre le fait que sa fiabilité n'est pas absolue, ne suffit pas. Il convient donc d'avoir une approche plus ciblée de la notion de distance, et de déterminer, autour de chaque collège, une zone dont les limites tiennent compte de la réalité du terrain et fassent sens pour les habitants d'un quartier donné. L'information à cet égard doit être transparente et accessible à tout un chacun, afin d'éviter des contestations liées notamment à l'existence de logiciels sur le marché qui calculent aussi les distances et pourraient donner des indications différentes.

L'élargissement de l'octroi de l'abonnement impliquera une augmentation importante de l'activité administrative liée à cette prestation, dont les modalités seront mises en œuvre en étroite collaboration avec les TL : envoi des attestations, renseignements aux parents d'élèves, mutations lors de déménagements, d'arrivées (entre 600 et 800 par année) et départs. Dans ce cadre, un émolument équivalent à celui de la carte junior sera perçu lors du retrait des abonnements annuels. Il s'élèvera donc à Fr. 20.— mais au maximum à Fr. 40.— par famille.

² UAPE: Unité d'accueil pour écoliers, destinée aux élèves du Cycle initial

³ APEMS: Accueil pour enfants en milieu scolaire, structure destinée aux élèves primaires de la 1^{ère} à la 4^{ème} année

6.3. Des bons de transports pour les autres élèves et les jeunes

L'autre facette de cette refonte du système d'octroi des abonnements aux élèves de la scolarité obligatoire répondant au critère de distance est la possibilité, pour tout enfant ou jeune de 11 à 20 ans, d'obtenir un bon de transports permettant d'acquérir un abonnement annuel Mobilis deux ou trois zones. Ce bon permettra à tous les enfants dès l'âge du 5^{ème} degré scolaire ainsi qu'aux jeunes hors scolarité obligatoire, de bénéficier jusqu'à 20 ans d'un rabais de 50 % sur les abonnements annuels Mobilis. Outre l'extension aux jeunes en formation postobligatoire ou exerçant déjà une activité professionnelle, ces bons seraient ainsi également accessibles à des enfants tels que les élèves des écoles privées ou en formation dans des écoles ou institutions spécialisées.

6.4. Résumé des prestations transports

Classes	Abts Mobilis > 1km	Bons < 1 km	Bons	Pédibus
Cycle initial				X
1P – 2P				X
3P – 4P	X ⁴			
Elèves des établ. secondaires	X ⁵	X		
Autres élèves > 11 ans + jeunes jusqu'à 20 ans			X	

6.5. Logistique

Un des problèmes posés par la mise en place de l'ensemble du projet concerne le logiciel de gestion des élèves et des classes. Un tel projet nécessite non seulement la recherche et la mise en oeuvre d'un outil de gestion efficace pour le calcul de tous les cheminements piétonniers, mais aussi un outil de gestion scolaire comprenant notamment le fichier des élèves lausannois ainsi que l'ensemble des habitants de 0 à 20 ans. Pour le calcul des distances, une collaboration interne avec le SOI et le service du cadastre a permis de mettre au point, dans des délais raisonnables et à moindre coût, un outil et un projet cartographique intéressants, offrant même la possibilité d'envisager une consultation des données par Internet.

Quant au projet de nouveau logiciel de gestion scolaire, la ville de Lausanne attend depuis de longues années, pour remplacer une application communale devenue obsolète, le nouveau logiciel de gestion scolaire cantonal qu'elle aurait pu adapter au contexte de la gestion coordonnée des écoles lausannoises. La décision cantonale relative à la mise en oeuvre de cet outil de gestion de la formation appelé SIEF⁶, promis pour 2006, reporté en 2007 puis reporté à une date indéterminée a nécessité la mise sur pied en urgence d'un nouvel outil pour la gestion de la scolarité obligatoire à Lausanne. Cet outil a pu être mis sur pied en moins d'un an pour ses fonctionnalités de base. Mais le développement et déploiement de cette application se dérouleront au moins jusqu'à l'été 2009, afin d'assurer prioritairement la rentrée scolaire d'août 2009.

⁴ Abonnements attribués sur demande des parents

⁵ Abonnements délivrés d'office

⁶ SIEF pour Système d'Information des Etablissements de Formation, basé sur un logiciel d'origine autrichienne appelé *esa (pour *electronic school administration*)

La perspective d'une nouvelle gestion des transports a été incluse d'emblée dans les critères de choix de l'application et on sait que l'intégration de cette gestion à l'organisation de la rentrée scolaire peut être d'ores et déjà garantie et qu'elle sera réalisable dès la deuxième opération de convocation des élèves, soit pour la rentrée 2010.

Au niveau de l'organisation et des ressources humaines, la distribution de plus de 3800 attestations d'abonnement, le suivi de situations particulières (arrivées, départs, déménagements) ainsi que l'attribution des bons, en collaboration avec les TL, nécessitent la création d'un «guichet» spécifique pour cette gestion qu'il conviendra de lier à la gestion des transports scolaires.

7. Calendrier de mise en œuvre

Cette opération nécessite un important travail préparatoire pour assurer la crédibilité et la transparence des critères, la coordination avec les TL ainsi qu'un plan de communication auprès des futurs usagers. Il s'agit notamment de minimiser les risques de contestations et de recours quant aux limites d'attribution, de faciliter l'accessibilité aux informations et de mettre au point les modalités de distribution. Les opérations préalables à la mise en œuvre consistent en particulier :

- à déterminer, autour de plus de 40 bâtiments scolaires, les limites précises des zones correspondant à la limite théorique de 1 km, en vue d'une adaptation et d'une visualisation des limites calculées par l'ordinateur aux réalités du terrain. Cette opération nécessite un travail systématique à effectuer in situ puis à consolider en vue de réaliser la cartographie des zones;
- à analyser les situations particulières pour permettre l'élaboration d'un règlement d'utilisation, remplaçant l'ancien règlement cantonal sur les transports scolaires;
- à intégrer les données de TELEATLAS dans le logiciel de gestion scolaire LAGAPERL, dès qu'il sera opérationnel pour les autres tâches que la gestion scolaire;
- à intégrer et mettre en page les données cartographiques sur le site Internet de la Ville;
- à organiser la création d'une petite unité au sein du service des écoles, dédiée à la gestion des transports scolaires.

La réalisation de l'ensemble de ces opérations sera effectuée durant l'année 2009 et la mise en œuvre du dispositif pourrait donc s'effectuer dès le 1^{er} janvier 2010. Une introduction du système en milieu d'année scolaire poserait toutefois de nombreux problèmes pour la distribution des abonnements aux élèves. Elle pourrait donc entrer en vigueur en deux temps, soit au 1^{er} janvier 2010 pour l'envoi des bons aux jeunes qui ne sont plus scolarisés dans des établissements de la scolarité obligatoire et à la rentrée 2010 pour les abonnements et les bons destinés aux élèves. Ces modalités restent à étudier, et notamment la précaution à prendre d'annoncer la première étape de mise en œuvre de l'opération assez tôt pour éviter de nombreuses demandes de remboursement a posteriori de détenteurs d'abonnements annuels.

8. Les aspects financiers

Les coûts d'une telle opération et les charges qui en résultent pour le budget communal peuvent être calculés sur la base du nombre d'abonnements octroyés, d'une hypothèse quant au nombre de bons de transports qui seront utilisés et des modalités de financement de l'ensemble de cette opération.

8.1. Coût des abonnements écoliers

Le nombre d'élèves ainsi que la répartition et le coût des abonnements annuels pour les écoliers bénéficiant de la gratuité des transports se présente comme suit :

Tableau 2⁷

Nombre d'élèves domiciliés à plus de 1km			Prix de l'abonnement	Coût total	Emolument	Recettes totales
Cyp2 (3 ^{ème} et 4 ^{ème} année) *	5 ^{ème} à 9 ^{ème} année	Total				
298	2'769	3'067	369.—	1'132'000.—	20.—	61'000.—

(Chiffres basés sur l'effectif des élèves pour l'année scolaire 2008-2009)

8.2. Coût des bons de transports

Le coût probable des bons de transports délivrés aux écoliers domiciliés à moins de 1 km de l'école a été évalué sur la base du 50 % des élèves concernés. Il est évident que le montant articulé comporte une part importante d'incertitude et ne pourra être budgété correctement qu'après une ou deux années d'exercice.

Tableau 3a

Nombre d'élèves concernés	Taux d'abonnement	Nombre approximatif de bons délivrés	Valeur du bon 50%	Coût total	Emolument	Recettes totales
2'803	50 %	1'402	184.5	259'000.—	20.—	28'000.—

(Chiffres basés sur l'effectif des élèves pour l'année scolaire 2008-2009)

Le coût probable des bons de transports délivrés aux enfants lausannois dès l'âge du 5^e degré scolaire ainsi qu'aux jeunes de 16 à 20 ans non scolarisés dans un établissement de la scolarité obligatoire de Lausanne peut être évalué comme suit, sur la base de l'hypothèse que seuls 75 % des enfants concernés feront usage de cette possibilité :

Tableau 3b

Nombre d'enfants et de jeunes concernés	Taux d'abonnement	Nombre approximatif de bons délivrés	Valeur du bon 50%	Coût total	Emolument	Recettes totales
8'490	75 %	6'368	184.5	1'175'000.—	20.—	127'000.—

8.3. Coût total

Le coût total de l'opération doit être modulé en fonction du «statut» des enfants et des jeunes concernés. En effet, comme précisé plus bas (ch.8.4) les modalités de financement diffèrent entre les élèves scolarisés dans les établissements lausannois de la scolarité obligatoire et les autres enfants ou jeunes lausannois. La synthèse des données se présente donc comme suit :

⁷ Les montants en francs figurant sur les tableaux 2 à 4 sont arrondis au millier.

Tableau 4

	Dépenses	Recettes	Dépenses totales nettes
Abonnements écoliers	1'132'000.—	61'000.—	
Bons écoliers	259'000.—	28'000.—	
Total écoliers	1'391'000.—	89'000.—	1'302'000.—
Bons autres élèves >11 ans +jeunes jusqu'à 20 ans	1'175'000.—	127'000.—	1'048'000.—
Total	2'566'000.—	216'000.—	2'350'000.—

Le coût résultant de l'octroi de l'abonnement aux élèves des établissements scolaires domiciliés à plus de 1 km de leur lieu de scolarisation est évalué sur des bases précises. Il se monte à Fr. 1'132'000.—. A ce montant, il faut ajouter, dans le domaine des transports scolaires, un montant de Fr. 259'000.— pour le financement des bons. Les recettes escomptées sur l'octroi des abonnements ainsi que sur la délivrance des bons aux écoliers s'élèvent à Fr. 89'000.—.

Les charges nettes résultant des nouvelles normes d'attribution de la gratuité des transports scolaires ainsi que de l'octroi des bons aux écoliers de la scolarité obligatoire se montent donc à Fr. 1'302'000.—.

Quant au coût présumé des bons, il comprend une marge importante d'incertitude. En effet, il dépend du nombre d'enfants et de jeunes concernés utilisant le bon de transports pour acquérir l'abonnement Mobilis. Le montant total net des charges présumées résultant de l'achat de bons de transports est évalué, sur la base des hypothèses retenues, à Fr. 1'048'000.—.

Le total des charges nettes liées au projet présenté dans le présent préavis et compte non tenu des recettes provenant de la péréquation, s'élève donc à Fr. 2'350'000.—.

8.4. Financement de l'opération par la péréquation intercommunale

Les frais de transports scolaires sont intégrés aux coûts de transports à charge des communes selon les modalités de la péréquation intercommunale. Le mode de calcul actuel de la péréquation prévoit la prise en charge de 75 % des coûts de transports des communes dès lors que ces coûts dépassent 8 points d'impôts communaux, ce qui est le cas à Lausanne. Toute dépense supplémentaire n'est donc qu'à 25 % à charge de la Ville. Dans le cadre du projet proposé, le coût de transports des élèves de la scolarité obligatoire s'élevant à Fr. 1'302'000.— et la péréquation intercommunale prenant en charge 75 %, soit Fr. 976'000.—, le coût réel à la charge de la ville de Lausanne peut être évalué, selon le mode de calcul actuel de la péréquation intercommunale, à Fr. 326'000.—.

Quant aux coûts relatifs aux bons délivrés aux enfants et aux jeunes non ou plus scolarisés dans les établissements scolaires, ils n'entrent pas dans le cadre de la péréquation intercommunale. Ces dépenses, évaluées pour un montant net de Fr. 1'048'000.— seront donc entièrement prises en charge par le budget de la ville de Lausanne.

Le coût net total de l'ensemble de ce projet peut donc être évalué à Fr. 1'048'000.— + Fr. 326'000.—, soit Fr. 1'374'000.—.

8.5. Conséquences pour le budget

8.5.1. Abonnements et bons de transports pour les élèves de la scolarité obligatoire

Le coût de transports des élèves pour l'année 2009 est prévu au budget pour un montant de Fr. 520'000.—. Le coût prévu pour cette opération s'élève à Fr. 1'391'000.—. Déduction faite des recettes des émoluments qui seront perçus directement par les TL, les dépenses nettes s'élèveront à Fr. 1'302'000.—. C'est donc une augmentation des dépenses de Fr. 782'000.— qu'il conviendra de porter au budget du service des écoles primaires et secondaires dès 2010.

Les recettes enregistrées dans le cadre de la péréquation intercommunale passeront de Fr. 390'000.— à Fr. 976'000.—, soit une augmentation de Fr. 586'000.—. Ces recettes supplémentaires figureront au budget de l'administration générale et finances.

8.5.2. Bons pour les autres élèves et les jeunes

Cette nouvelle prestation ne figure pas au budget, il conviendra donc d'inscrire au budget 2010 et suivants du service des écoles primaires et secondaires des dépenses pour un montant net évalué à Fr. 1'048'000.—

8.5.3. Charges de personnel

A ces coûts, il convient d'ajouter un demi EPT de secrétaire rattachée au service des écoles primaires et secondaires, pour la gestion des transports scolaires, pour un coût moyen de Fr. 45'000.—, charges comprises.

9. Postulat Grégoire Junod

«Des transports publics gratuits pour les enfants et les jeunes de moins de 20 ans»

9.1. Contenu du postulat

Motion à l'origine, ce postulat demande la gratuité des transports publics à Lausanne pour les enfants et les jeunes de moins de 20 ans. Le but de son auteur est d'encourager le recours "réflexe" aux transports publics dès le plus jeune âge et d'aider ainsi à la diminution du trafic individuel motorisé. En séance de Commission, M. Grégoire Junod a relevé qu'une aide à la famille par ce biais constitue également l'un de ses objectifs, les tarifs TL ayant augmenté d'environ 20 % depuis le début des années 2000.

L'auteur du postulat propose de procéder par bons annuels, vendus à un prix symbolique (Fr. 25.— par exemple), qui permettraient de retirer un abonnement Mobilis gratuit. Le financement serait assuré par la Ville qui rembourserait aux TL les abonnements délivrés gratuitement. La vente des bons permettrait de couvrir les frais administratifs. Quant au coût global de la mesure, il serait diminué par la suppression des frais de transports scolaires et par une réduction de la participation de la Ville au déficit des TL dont les recettes augmenteraient du fait d'un volume d'abonnements juniors plus important.

9.2. Réponse de la Municipalité

Les débats de votre Conseil lors de la séance de prise en considération du postulat⁸ ont abouti à la conclusion que la meilleure méthode pour aborder la question est de réfléchir à une modification du système kilométrique de prise en charge par la Ville des frais de transports publics encourus par les enfants et les jeunes en âge de scolarité. C'est la raison pour laquelle, la Municipalité a étudié la mise en place d'un nouveau système d'attribution d'abonnement de bus pour les écoliers lausannois, selon des modalités décrites dans le présent préavis. En cela la Municipalité apporte une réponse à cet aspect du postulat.

Le postulat traité ici va au-delà des transports scolaires puisqu'il demande que tous les jeunes jusqu'à l'âge de 20 ans bénéficient de la gratuité. Plutôt que la gratuité totale des transports publics, la Municipalité, qui encourage également la mobilité douce (vélo, marche à pied) et entend rappeler que tout déplacement, même en transport collectif, engendre un coût et des conséquences environnementales, se propose d'accompagner les jeunes dans la transition vers les transports publics au lieu de la voiture individuelle. Elle propose ainsi d'élargir⁹ le dispositif proposé pour les élèves secondaires domiciliés à moins d'un kilomètre de leur collège aux jeunes jusqu'à 20 ans. Par cette nouvelle politique en matière de transports et d'encouragement des jeunes de moins de 20 ans à l'utilisation des transports publics, la Municipalité pense avoir répondu au postulat Junod.

10. Conclusions

Fondée sur ce qui précède, la Municipalité vous demande, Monsieur le Président, Mesdames et Messieurs, de bien vouloir prendre les résolutions suivantes :

Le Conseil communal de Lausanne,

vu le rapport-préavis n° 2009/16 de la Municipalité, du 1^{er} avril 2009 ;

ouï le rapport de la commission nommée pour examen de cette affaire;

considérant que cet objet a été porté à l'ordre du jour,

décide :

1. d'allouer un abonnement annuel gratuit à tous les élèves de la scolarité obligatoire, dès le deuxième cycle primaire, domiciliés à plus de 1 km de l'école, selon les dispositions prévues dans le présent préavis;
2. de porter au budget 2010 du service des écoles primaires et secondaires, rubrique 5800.318, le montant de Fr. 1'302'000.— permettant de couvrir les charges financières de cette prestation pour les écoliers de la scolarité obligatoire;
3. de porter au budget 2010 de l'administration générale et finances, rubrique 1100.451, les recettes supplémentaires enregistrées dans le cadre de la péréquation intercommunale pour les frais de transports des élèves de la scolarité obligatoire;

⁸ BCC N° 6/I, 2006, pp 475 ss

⁹ Selon le calendrier décrit au chapitre 7 du présent préavis

-
4. d'octroyer pour tout enfant ou jeune de 11 à 20 ans, un bon de transports permettant de bénéficier d'un rabais de 50 % sur les abonnements annuels Mobilis, selon les dispositions mentionnées dans le présent préavis;
 5. de porter au budget 2010 du service des écoles primaires et secondaires, rubrique 5800.318, le montant de Fr. 1'048'000.— permettant de couvrir les charges financières des bons attribués aux enfants et aux jeunes non scolarisés dans un établissement de la scolarité obligatoire;
 6. d'accepter la création d'un poste de secrétaire à 50 %;
 7. de considérer ce préavis comme la réponse au postulat Grégoire Junod intitulé *«Des transports publics gratuits pour les enfants et les jeunes de moins de 20 ans»*.

Au nom de la Municipalité

Le syndic :
Daniel Brélaz

Le secrétaire :
Philippe Meystre

Appendix B

Organisation des établissements
scolaires de la région Lausanne à
l'horizon 2015-2020. *Rapport final
sur la proposition de mise en
œuvre LEO/Harmos* (G.Dyens, 2012)

Organisation des établissements scolaires de la région Lausanne à l'horizon 2015-2020

Organisation des établissements scolaires de la région Lausanne à l'horizon 2015-2020

Rapport final sur la proposition de mise en œuvre LEO/HarmoS

Préambule

Initié par une rencontre préalable avec la DGEO au printemps 2009, le groupe de travail appelé « *Horizon 2020* », constitué de représentants de la CRL, de la répondante pour Lausanne de la DOP et des chefs des services communaux responsables du parascolaire s'est réuni pour une première séance le 26 octobre 2009, sous la présidence du soussigné. Cette séance a été consacrée à un historique de l'organisation scolaire lausannoise issue de la nouvelle loi scolaire entrée en vigueur en 1986. Elle a également permis de définir les principales hypothèses de travail à savoir:

- l'augmentation nécessaire du nombre d'établissements lausannois, en raison de leur taille actuelle et des perspectives démographiques;
- la nécessité d'une étude quantitative et spatiale de la réalité de l'infrastructure et des différents bassins de population répartis sur l'ensemble du territoire;
- l'examen, sur la base des données de population ainsi que de la taille et de la localisation des bâtiments actuels, de la faisabilité d'un scénario « idéal » comprenant dix établissements primaire 1-8 et cinq établissements secondaires 9-11, avec cinq zones secondaires, chacune d'elles étant « empilée » sur les deux zones primaires correspondantes.

Au cours des deux séances suivantes, d'autres scénarios ont été évoqués, notamment celui de la mise sur pied de 14 ou 15 établissements 1-11. Un examen rapide des problèmes posés et des conséquences tant financières qu'organisationnelles d'un tel bouleversement ont conduit très vite à l'abandon pur et simple de ce scénario de découpage du tissu urbain très inadapté en zone de forte densité.¹

Au vu de l'urgence de diminuer en priorité la taille des établissements primaires actuels, un deuxième scénario a été évoqué d'emblée comme pouvant remédier à ce problème dans des délais rapide. Il s'agit de la mise en œuvre d'une première étape de réorganisation par un redécoupage des zones primaires, en vue d'un passage de 5 à 7 établissements primaires sous leur forme actuelle.

Le groupe de travail a toutefois souhaité poursuivre jusqu'au bout l'analyse de l'hypothèse 10 EP 1-8 / 5 ES 9-11. Un mandat a donc été attribué à un doctorant en géographie connaissant très bien le terrain, puisqu'il a réalisé un travail important relatif à la nouvelle politique des transports et en particulier à l'opération de mesure et de numérisation des distances piétonnières entre tous les domiciles et toutes les adresses des bâtiments scolaires.

L'analyse ainsi effectuée des bassins de population en relation avec la localisation et la capacité d'accueil des bâtiments scolaires a donné lieu à l'élaboration d'une série de cartes très illustratives des problèmes auxquels se heurte le scénario préférentiel choisi comme hypothèse de départ.

¹ Suite à un rapport intermédiaire du GT Horizon 2020, décision avait été pris d'écarter de l'étude l'hypothèse d'une solution de mise sur pied d'établissements 1-11. L'argumentation figure dans le *Rapport intermédiaire No 1, janvier 2010*, élaboré à l'issue de la séance du GT du 12 janvier 2010.

1. Constats et propositions

1.1. Conclusion de l'analyse quantitative²

L'analyse chiffrée effectuée pour examiner la faisabilité de la mise en place de 10 établissements de 8 volées futures primaires a mis en évidence et confirmé un important déséquilibre sur l'ensemble du territoire entre la densité de la population des secteurs de la ville et la capacité d'accueil des bâtiments de ces mêmes secteurs³. Dans ce cadre, le découpage théorique en 10 zones scolaires conduit à une impasse, si l'on veut respecter les critères essentiels suivants :

- une dimension de l'établissement comprenant entre 800 et 1000 élèves ;
- une localisation des bâtiments à l'intérieur de la zone de recrutement de l'établissement concerné ;
- une cohérence avec un secteur géographique de la ville et une accessibilité, tenant compte de l'âge des élèves, à pied ou par les transports publics ;
- une attention portée à la mixité sociale des bassins de recrutement ;
- un équipement adapté à l'âge des élèves et à leur degré de scolarité ;
- un accès facilité aux structures parascolaires ;
- une réorganisation limitant au maximum les investissements et les coûts supplémentaires en matière d'infrastructures scolaires.

Autre conclusion de l'étude : les scénarios imaginés pour le découpage des 10 zones de 8 volées primaires révèlent également un problème apparemment sans solution si l'on vise à garantir une gestion cohérente et rationnelle des classes et des collèges rattachés à une direction d'établissement.

En effet, le nombre de classes de CYT localisées aujourd'hui dans des bâtiments à grande capacité⁴ (entre 6 et 9 classes par volée, soit un total de 12 à 18 classes, que l'on ne peut déplacer sans vider les locaux existants et en reconstruire ailleurs), se traduit par des zones de recrutement étendues. Or ces zones recoupent, selon les secteurs concernés, jusqu'à trois zones de recrutement suggérées par les différents découpages possibles de la ville en 10 établissements primaires 1-8.

La conséquence de cette superposition de zones est que le rattachement à des EP 1-8 des classes CYT actuellement secondaires impliquerait un rattachement potentiel de classes futures 7^e et 8^e localisées dans un même complexe scolaire à deux ou trois établissements primaires différents, soit 2 ou 3 directions scolaires dans un même lieu scolaire abritant par ailleurs une majorité d'élèves secondaires. C'est la conséquence inévitable de la densité urbaine dans un système d'établissements scolaires formés d'un réseau de bâtiments. Point n'est besoin d'explications de détail pour en conclure qu'une généralisation d'établissements primaires 1-8 n'est pas envisageable sur l'ensemble du territoire de la ville.

1.2. L'ouverture à une solution modulaire

La démonstration déjà effectuée des problèmes majeurs auxquels se serait heurtée la mise sur pied d'établissements 1-11⁵ s'applique donc également aux différents scénarios prévoyant une généralisation d'EP 1-8. La seule organisation scolaire permettant la mise en place de la LEO et d'HarmoS dans les meilleures conditions possibles doit donc se fonder aujourd'hui sur le principe de la transformation des établissements actuels en établissements mixtes comprenant les deux dernières années primaires et les trois volées secondaires du 9^e au 11^e degré de la scolarité

² Cartes élaborés par M.T. Emmanouilidis, géographe, sur les bassins de recrutement et la capacité d'accueil des bâtiments présentées au Conseil d'établissements de Lausanne le 8 décembre 2011.

³ Voir carte annexée *Population scolaire résidente et capacité scolaire*

⁴ Voir cartes annexées *Bassins de population d'élèves Niveau HarmoS 1-2 et 7-8*

⁵ Voir note 1, p. 1

obligatoire. Mais ce choix doit s'accompagner d'une perspective nouvelle. En effet, pour l'un ou l'autre des secteurs de la ville⁶, il faut tendre vers une solution 1-8, si elle est susceptible de faciliter la mise sur pied d'une meilleure répartition des élèves et d'assurer une meilleure cohérence des zones de recrutement du ou des secteurs concernés.

Une telle ouverture vers une solution modulaire, qui verrait ainsi, à terme, cohabiter à Lausanne quatre types d'établissements (1-6/7-11, 1-8/7-11 ou 1-8/9-11), comporte toutefois un préalable sans lequel toute modification de la structure actuelle des établissements lausannois est inimaginable. Ce préalable est le feu vert du DFJC pour la création de deux ou trois établissements supplémentaires sur le territoire lausannois, en privilégiant si possible la création d'établissements primaires 1-8.⁷

2. Le contexte historique de l'organisation actuelle des écoles lausannoises

2.1. L'héritage d'un système scolaire sélectif

Le déséquilibre relevé entre les bassins de population et la capacité d'accueil des bâtiments scolaires s'explique notamment par l'histoire du système scolaire vaudois, marquée par deux structures parallèles, celle des anciens « collèges secondaires » et celle des anciens bâtiments abritant des classes primaires et primaires supérieures avant la réforme de 1986.

En effet, en raison d'un bassin de recrutement comprenant le grand Lausanne élargi à l'ensemble de la couronne de la ville, les anciens « collèges secondaires » ont été construits au centre ou à la périphérie du centre, soit à une distance raisonnable de la gare et de St-François, avec une forte capacité et un équipement important de salles spéciales. Il s'agissait des collèges de Villamont, de Béthusy, du Belvédère, de la Mercerie puis de l'Elysée, et des Bergières. Les bâtiments primaires quant à eux ont été édifiés au fur et à mesure du développement de la ville dans une logique de quartier, d'abord dans la périphérie du centre actuel, avec Beaulieu, Croix d'Ouchy, Mon-Repos (Villamont-Dessus), Barre, Prélaz et Montriond entre 1889 et 1914, des collèges comme Montoie, Valency, La Sallaz, Malley, Montchoisi, et Floréal dans les années 1950, puis la grande série des CROCS, conséquences du baby-boom des années 1960-1970 (Figuier, Rouvraie, Coteau-Fleuri, Grand-Vennes et la Vallée de la Jeunesse).

2.2. La réforme de 1986 et ses conséquences concrètes

La loi scolaire de 1984 a modifié profondément les structures et l'organisation de l'école vaudoise. Lausanne a joué alors le jeu de cette réforme historique et aura investi globalement entre 200 et 300 millions en 25 ans pour l'adaptation de son parc immobilier.

C'est donc en application de la nouvelle loi scolaire de 1984 que la carte scolaire a été entièrement redessinée pour la rentrée 1986. Cette réorganisation a été marquée par un double mouvement : celui d'une décentralisation concentrée en vue de la création de sept grands ensembles scolaires secondaires destinés à accueillir tous les élèves de la 5^e à la 9^e, et celui fondé sur une logique de proximité pour tous les autres bâtiments accueillant des élèves des classes enfantines et primaires comprenant les 6 volées de -2 à +4. Cette réorganisation complète de la répartition des classes lausannoises s'est donc traduite par un recentrage des zones de recrutement des classes -2 à +4 autour de chacun des bâtiments « restés » tout ou partiellement primaires, et par la création de zones de recrutement plus étendues, par déplacement progressif, opéré sur plusieurs années, de tous les élèves devenus secondaires vers les sept complexes scolaires progressivement aménagés pour les accueillir. Les plus gros changements sont intervenus dans les secteurs nord et nord-est de la ville, qui ne comprenaient pas de collège secondaire avant 1986.

⁶ Par exemple dans les régions les plus denses comme les quartiers de Prélaz ou de Bellevaux, aux Plaines-du-Loup où va se développer un nouveau quartier de grande dimension, ou encore dans les quartiers situés entre la route de Berne et la route d'Oron avec les futures constructions du quartier des Fiches et de la Feuillère.

⁷ La question des projets de constructions et de mise sur pied d'établissements liés aux développements futurs de la ville dans les zones couvertes par les schémas directeurs de l'ouest (SDOL, avec Prilly et Renens) et du nord de Lausanne (SDNL, avec Prilly, Cheseaux, Romanel et Jouxteins) est à examiner de façon spécifique.

C'est ainsi que l'établissement de Montolieu (appelé alors ES du Nord-est lausannois), créé au départ avec cinq bâtiments scolaires (La Sallaz, Grand-Vennes, Coteau-Fleuri, Villamont-Dessus et Chailly), a vu les élèves du secteur nord-est de la ville se regrouper pour la plupart à Grand-Vennes, avec le maintien d'une unique antenne 5^e-6^e à Coteau-Fleuri. Ce regroupement a été rendu possible par la construction du collège primaire de Boissonnet, dimensionné pour accueillir 6 volées d'enfants du quartier, et par l'agrandissement du collège de Coteau-Fleuri.

C'est ainsi également que l'établissement C.F. Ramuz (appelé alors établissement du Nord-Ouest lausannois), qui abritait des classes dans les collèges d'Entre-Bois, de la Rouvraie, de la Barre, de la Pontaise et même de Pierrefleur, a vu ses élèves regroupés dans les collèges d'Entre-Bois et de la Rouvraie.

C'est ainsi enfin que des collèges primaires proches d'établissements secondaires se sont vu tout ou partiellement rattacher à la direction secondaire la plus proche (Croix-Rouges pour le Belvédère, Mon-Repos pour Béthusy, Croix d'Ouchy pour l'Elysée, ainsi que St-Roch et Prélaz pour Villamont.

2.3. Etablissements primaires: proximité et répartition sur l'ensemble du territoire

Ce déplacement d'élèves destiné à la création des sept établissements secondaires 5-9, rendu possible par des transformations, des agrandissements et des constructions scolaires, a donné à la gestion des cinq établissements primaires, créés en 1988, une importante marge de manœuvre pour gérer une scolarisation de proximité et consolider des « zones de recrutement » adaptées à chaque bâtiment et donc à chaque quartier de la ville. A l'inverse, cette logique de proximité a permis à chaque quartier de la ville de bénéficier d'un collège aisément accessible pour les jeunes élèves, dans 35 collèges ou classes dispersées pour les classes enfantines et un peu plus de 30 lieux pour les classes de 1^{ère} à 4^e primaire.⁸

Outre l'application d'une structure scolaire entièrement nouvelle qui permettait enfin à tous les élèves devenus secondaires d'être scolarisés sous le même toit dans chacun des sept secteurs de la ville, ces importants déplacements ont donc donné aux établissements et aux bâtiments primaires une marge de manœuvre et de fonctionnement, qui a notamment permis, dans des collèges tout ou partiellement libérés de leurs « anciens grands élèves primaires », d'accueillir les nombreux élèves supplémentaires venus, année après année, grossir les volées successives.

Nous reviendrons ultérieurement sur une problématique propre aux établissements primaires actuels : celle de leur taille en termes de nombres d'élèves et d'étendue de leur périmètre global de recrutement, dessiné en 1988 pour réaliser une première décentralisation de la gestion des classes primaires lausannoises. Depuis 1986, ces classes étaient en effet entièrement sous la direction d'un service des écoles primaires qui gérait, depuis Chauderon, 340 classes et 5600 élèves.

2.4. La dimension parascolaire

La marge de manœuvre créée dans de nombreux bâtiments dédiés au primaire par la grande réorganisation de la fin des années 1980 a eu un second effet important : celui de contribuer au à l'accélération du développement des prestations parascolaires. C'est en effet grâce à l'utilisation des espaces dégagés par le regroupement des classes 5^e à 9^e, que dans des bâtiments tels que La Barre, Chailly, Floréal, Montchoisi, Montriond, Montoie ou La Sallaz, des structures d'accueil, appelées précisément **Accueil Pour Enfants en Milieu Scolaire** ont pu s'ouvrir et se développer, pour répondre à la demande des parents des élèves de 1 à 4P.

A ce jour, le nombre d'APEMS s'élève à 21 qui constituent, avec leurs « antennes », essentiellement destinées aux accueils de midi, 38 lieux de prise en charge. Onze structures sont situées dans le bâtiment scolaire lui-même et toutes les autres à proximité. Elles sont dimensionnées et aménagées en fonctions des quatre volées 1-4P scolarisées dans les collèges

⁸ Au moment de l'introduction de la nouvelle gestion des transports et grâce au logiciel de calcul des distances par les chemins piétonniers, on a pu constater que la presque totalité des élèves de CIN et de CYP (à l'exception de ceux domiciliés dans les hameaux des Râpes), habitent à moins de 1 km de leur école.

qu'elles « desservent », les élèves CIN étant pris en charges dans les UAPE, elles aussi situées et aménagées en fonction de lieux de scolarisation des élèves des deux volées des classes CIN.

3. Donnée de base et contraintes

3.1. Proximité, mobilité et âge des élèves

L'organisation actuelle des écoles lausannoises représente donc une construction édifiée pierre à pierre durant un quart de siècle⁹ sur la base de la donne posée par la réforme introduite en 1986. Elle constitue un ensemble d'éléments fortement interdépendants : densité de population, capacité d'accueil et équipement des bâtiments, zones de recrutement, dimension de l'établissement et équipement parascolaire. **Mais l'édifice repose sur un pilier spatio-temporel fondamental : celui de la proximité versus de la mobilité des élèves au fur et à mesure de leur autonomie et de leur capacité de déplacement.** C'était en effet, dès 1986, la seule manière de dépasser le déséquilibre, inhérent au parc immobilier scolaire lausannois, entre la densité des différents quartiers, l'emplacement des bâtiments et leur capacité d'accueil. Aujourd'hui également, ce n'est que sur cette même base que la répartition des classes sur l'ensemble du territoire est réalisable.

Avec la réforme de 1986, c'est bien le passage en 5^e année qui a déterminé cette répartition d'élèves, dont l'âge et donc leur capacité de déplacements permettaient effectivement le regroupement dans de plus grands ensembles dimensionnés et équipés pour les accueillir. Les zones de recrutement des élèves primaires actuels sont en effet d'abord celles des quartiers situés dans l'environnement proche de bâtiments de taille réduite ou moyenne du quartier. Dès la 5^e année, l'âge des élèves et la réalité des infrastructures existantes conduisent à inverser la logique et à scolariser dans un même lieu de grande capacité d'accueil un plus grand nombre de classes parallèles formées d'élèves domiciliés dans un rayon plus large. L'amélioration sensible du réseau des transports avec l'apparition du M2 et du réseau 08, ainsi que la nouvelle politique lausannoise en matière de financement des abonnements *Mobilis* ont d'ailleurs donné plus de poids encore à ces principes fondateurs.

Cette mobilité, qui permet d'utiliser de façon rationnelle les grands complexes scolaires existants, a également l'avantage d'augmenter le nombre d'élèves par entité scolaire et de faciliter ainsi un équilibrage des effectifs des classes, tant à l'interne d'un établissement qu'entre établissements. On parvient ainsi à une utilisation particulièrement efficiente des ressources, autant du point de vue de l'enseignement que de celui des locaux scolaires.¹⁰ Sans compter que leur prise en charge parascolaire devra également être développée dans les dix lieux déjà existants dans les établissements secondaires actuels.

3.2. Les facteurs conjoncturels

Trois facteurs limitent également la marge de manœuvre disponible pour une réorganisation de la structure des établissements scolaires.

- a) Le développement de la ville et sa démographie galopante (le nombre de naissances a passé de 1224 en 2002 à 1620 en 2011, soit une augmentation de 35% !) entraînent un taux actuel d'occupation presque maximum des locaux scolaires. Le parc immobilier n'offre presque plus de marge de manœuvres et des constructions provisoires vont recommencer à fleurir sur le territoire. Ces constructions devront inclure chaque fois des espaces pour le parascolaire.
- b) Le plan des investissements de la commune doit concilier la triple nécessité de poursuivre et d'achever la « campagne » d'assainissement du parc immobilier scolaire amorcée en 1992¹¹, de réaliser les adaptations, rénovations voire agrandissements parfois urgents de plusieurs

⁹ La rénovation de Villamont en constitue la dernière pierre, mis à part la construction d'un agrandissement « en dur » du collège de Grand-Vennes pour remplacer les modules provisoires.

¹⁰ A cet égard, il vaudrait la peine de calculer sur la durée les économies considérables ainsi réalisées grâce à la mobilité et à la perméabilité des établissements. Elle se chiffre en millions chaque année et en dizaines de millions depuis la réforme de 1986.

¹¹ Notamment pour de gros bâtiments historiques tels que St-Roch ou Montriond

collèges et de prévoir de nouvelles constructions, telles que les collèges des Fiches et des Plaines-du-Loup.

Dans ce contexte, il n'y a donc pas de disponibilités financières pour des restructurations de bâtiments scolaires qui seraient liées uniquement à une réorganisation structurelle des établissements.

- c) Autant les perspectives démographiques à moyen terme que les inévitables modifications que la loi scolaire devra introduire avant et après sa mise en application pourraient conduire à revoir d'ici 2020 certains éléments d'organisation. Cette réalité confirme l'importance de prévoir pour l'avenir une modularité de la structure des établissements lausannois. Mais la condition de cette modularité est l'augmentation indispensable du nombre d'établissements, puisque la simple extrapolation du nombre d'élève CIN prévus pour la rentrée 2012-2013, soit 1400 par volée, conduit théoriquement, si ce nombre restait constant, à un nombre total de 15400 élèves (soit 2600 élèves de plus qu'aujourd'hui !). C'est donc non pas 14, mais au minimum 15 établissements qu'il faudra sans doute prévoir pour Lausanne, dont deux établissements supplémentaires dans les meilleurs délais et un quinzième à relativement court terme.

4. La dimension pédagogique

4.1. Le « schéma » HarmoS et sa traduction dans les structures

Tous les schémas d'organisation publiés en lien avec la mise en place d'HarmoS présentent un cursus harmonisé comprenant deux cycles primaires de 4 ans et un cycle secondaire de 3 ans. Ces schémas ont essentiellement pour but de définir les trois moments clés où sont déterminés les standards pédagogiques harmonisés pour l'ensemble de la Suisse. Ils stipulent d'autre part que l'enseignement dans les huit premières années de la scolarité obligatoire doit être de type primaire. Or ces schémas peuvent donner l'impression que le cursus scolaire d'un élève devrait formellement se dérouler successivement huit ans dans un établissement primaire et trois ans dans un établissement secondaire. L'approche des structures d'établissement induites par le modèle suggéré par HarmoS porterait à calquer les principes d'organisation sur la logique du 1-8 / 9-11, voire de le considérer comme une structure modèle.

L'extension de la formule d'établissements 1-11 dans le canton montre que le DFJC a eu la sagesse de se distancier du « modèle » suggéré par HarmoS et il est vrai que, lorsque le bassin de population et l'organisation scolaire du territoire et les infrastructures le permettent, cette solution est particulièrement bienvenue, même si elle n'est pas totalement conforme à l'esprit d'HarmoS. En effet, le schéma d'organisation implicite peut sous-entendre que l'enseignement dans les trois années secondaires doit être dispensé dans des établissements spécifiques, comme c'est le cas dans les cantons voisins qui ont adapté leurs infrastructures scolaires de longue date sur une structure 1-6/7-9. L'option 1-11 est donc une particularité vaudoise bien adaptée dans des petites et moyennes agglomérations rurales ou suburbaines, mais ne saurait constituer une norme, quels qu'en soient les atouts indiscutables.

On l'a vu plus haut, l'introduction d'HarmoS à Lausanne devra certes tendre vers une vision dynamique des changements futurs, qui devront progressivement privilégier une approche comprenant d'une part des établissements primaires 1-8 et d'autre part des établissements secondaires 9-11. Mais elle devra s'appuyer d'abord, à court voire à moyen terme, sur un modèle de type 1-6 / 7-11, soit sur la mise sur pied d'établissements primaires et d'établissements mixtes.

Soucieuse d'assurer les meilleures conditions possibles aux réformes découlant de l'accord intercantonal HarmoS, de la LEO et bientôt de la LPS, la CRL a jugé important de s'interroger sur les questions essentielles relatives à cette mise en œuvre, à savoir la dimension de l'encadrement des élèves et ainsi que de l'introduction du PER.

4.2. Des questions très ouvertes

En l'absence de toute argumentation élaborée à ce jour et pour dépasser les formules toutes faites sur des notions implicites comme les injonctions en faveur d'une « continuité pédagogique », de la

« proximité et du sentiment d'appartenance à l'établissement », de la cohérence de cycles de quatre ans ou de la responsabilité du suivi d'un élève, la CRL s'est limitée à questionner les différents éléments relatifs à la dimension pédagogique du passage sous le « régime » HarmoS. Elle a tenté de les identifier et de s'interroger sur les avantages et les inconvénients des différentes structures d'établissements envisageables, en particulier les formules 1-8 / 9-11 versus 1-6 / 7-11. Un long échange sans a priori a permis notamment d'aborder les éléments suivants :

- Les années 7-8 seront celles de l'orientation. Le transfert de compétences acquises par 25 ans de pratique en CYT dans ce domaine revêt une grande importance, tout comme la connaissance de l'enseignement et des exigences des années subséquentes liée à la mixité « verticale » propre aux ES actuels ;
- La logique de l'horaire des élèves est celle de cycles de 2 ans et non de 4 ans, tout comme les maîtrises de classe et les équipes à la tête des classes qui changent tous les deux ans avec des changements de bâtiments intervenant parfois de toutes façons en fin de CIN ou de CYP1. La logique des 4 ans semble donc être essentiellement liée aux objectifs généraux du PER et n'induit pas une structure et une organisation prédéterminée ;
- La situation des classes actuelles du CYT dans un bâtiment primaire, où les élèves sont les plus grands parmi les petits et celle des mêmes degrés dans un bâtiment secondaire où ils sont les petits parmi les grands ne semble pas révéler des avantages ou inconvénients évidents de l'une ou l'autre des formules existantes ;
- Le passage d'un bâtiment/établissement à un autre entre 10 et 11 ans, soit à un moment important pour le développement de l'enfant et de son autonomie, peut aussi bien représenter une étape de transition positive, avec un encadrement qui évolue parallèlement pour l'école et pour le parascolaire (fierté de grandir et étape symbolique) qu'un risque de discontinuité dans le cursus de l'élève ;
- La présence de deux années primaires dans un établissement comprenant également les années 9-11, ce qui sera le cas dans la majorité des futurs établissements, peut favoriser la transition-orientation et assurer une continuité par rapport à la suite ou représenter un risque de rupture par rapport aux années antérieures,

Aucun argument décisif ne semble permettre d'accorder la préférence à une structure calquée sur le schéma HarmoS 4+4+3, ou sur une formule 1-6 / 7-11.¹² Cette dernière structure, imposée à court et à moyen terme par la réalité des infrastructures existantes a en particulier l'avantage d'une possibilité de décision rapide sur les modalités de l'introduction d'HarmoS dans la région Lausanne, ce d'autant plus que le caractère modulaire du scénario qui résulte des conclusions du présent rapport, peut conduire à terme à la constitution d'un ou de plusieurs établissements primaires 1-8.

5. Application de la LEO et d'HarmoS : des enjeux qui priment sur l'organisation des établissements

Les principaux enjeux de l'introduction d'HarmoS ne se situent pas au niveau de l'organisation des établissements. Une solution pragmatique, telle que préconisée ci-dessus, qui met l'accent sur la faisabilité dans les meilleurs délais et au moindre coût, avec le moins d'investissement possible en temps et en énergie sur les aspects logistiques, doit être privilégiée, au profit des quatre priorités suivantes :

- la mise en œuvre du PER est un enjeu central par le rôle qu'il est amené à jouer, d'une part au plan didactique, dans la coordination des moyens d'enseignement utilisés en Suisse romande et, d'autre part, au plan de l'évaluation, dans la définition des standards nationaux de formation, dans l'élaboration d'épreuves communes à l'Espace romand de la formation et dans la description de profils de connaissance/compétence pour la fin de la scolarité obligatoire. La mise en pratique du plan d'études romand va demander un

¹² Les cantons peuvent subdiviser ces cycles en degrés, *Convention scolaire romande, article 5, alinéa 4.*

investissement important de tout le corps enseignant. Cet investissement ne peut guère être optimum si l'on prolonge les incertitudes quant au cadre dans lequel les enseignants vont travailler ;

- un discours analogue peut être tenu concernant l'autre priorité que sera l'introduction des modifications structurelles consécutives à la mise en œuvre de la LEO (orientation, mise en niveaux, organisation des deux divisions etc.). Une refonte complète de la structure des établissements, au demeurant en grande partie illusoire comme on l'a montré, avec l'énergie considérable que cela requerrait autant pour les autorités locales, les directions que le corps enseignant, simultanée aux deux vastes opérations d'introduction du PER et de la LEO, aurait des retombées très négatives sur les conditions de travail, la qualité et le déroulement de ces deux réformes importantes ;
- le passage d'un cycle de transition de type secondaire à un « cycle primaire 7^e-8^e » est un changement induit par Harmos dont l'enjeu est central. Dans ce cadre, la préoccupation principale sera la répartition des enseignants et de l'enseignement, avec l'objectif d'une limitation marquée du nombre d'enseignants intervenant en 7^e et 8^e année, d'un changement dans la culture de travail et de collaboration, ainsi que dans l'approche pédagogique des équipes de maîtres à la tête de ces classes ;
- l'évolution du concept d'accueil de jour, en particulier pour les 10-12 ans et les 12-15 ans, est étroitement liée à la réflexion sur l'utilisation des locaux scolaires et le partenariat entre les communes et les directions d'établissements. Une étude est en cours à Lausanne pour examiner, entre autres, les possibilités d'un renforcement de l'accueil parascolaire des futurs 7^e-8^e primaire, autour des actuels réfectoires secondaires qui offrent déjà tout ou partie de l'infrastructure nécessaire.

Les trois premières priorités ci-dessus, leurs modalités de mise en œuvre et les calendriers respectifs sont entièrement du ressort du DFJC et des directions d'établissements. La dernière est essentiellement du ressort des autorités et des services communaux. Mais il y a de fortes interactions entre ces différents aspects de la mise en œuvre d'HarmoS.

6. Un premier scénario retenu : le passage à 7+7

Un premier scénario retenu par le groupe de travail était de centrer la réorganisation des établissements scolaires lausannois sur un objectif prioritaire, revêtant une certaine urgence et réalisable dans un délai raisonnable avait à l'avantage de ne pas être un préalable indispensable à l'application de la LEO et à l'introduction d'HarmoS. Il s'agissait de passer, dans les meilleurs délais, de 5 à 7, voire 8 établissements primaires et donc de réduire ces établissements à une dimension raisonnable d'environ 1000 élèves par établissement. Majoritairement constitués des six premières volées primaires, certains auraient également pu, à terme et en fonction de la densité du développement de certains quartiers, comprendre les 8 volées primaires.

Depuis la création, en 1988, des cinq établissements primaires lausannois deux éléments importants, l'un quantitatif, l'autre qualitatif, ont considérablement évolué :

- le nombre d'élèves d'abord: les cinq établissements primaires accueillaient en 1988 un total de 5600 élèves, soit une moyenne de 1120 élèves par établissement. A la rentrée 2011, le même nombre d'établissements accueille 6750 élèves, soit une moyenne de 1350 élèves de CIN et de CYP par établissement. Le plus grand établissement regroupe aujourd'hui plus de 75 classes dans 13 bâtiments ou lieux scolaires et un total de l'ordre de 130 enseignants. Même si l'encadrement a décuplé en quelque 20 ans (de quatre à une cinquantaine de périodes de décanat formant désormais un conseil de direction autour du directeur ou de la directrice), la tâche est considérable et tend à s'accroître ;
- l'enseignement primaire a considérablement évolué à tous les niveaux : augmentation du nombre d'enseignants intervenant dans les classes, développement des mesures de pédagogie compensatoire, de soutien spécialisé et de cours intensifs de français, création et développement des équipes pluridisciplinaires, collaboration avec les structures

parascolaires, évolution de la population scolaire et multiplication de cas d'élèves en difficulté ou intégration d'élèves porteurs de handicap.

Sans remettre en cause le principe de modularité des structures évoquées plus haut, puisque son application pourrait créer des conditions plus favorables à la création d'un ou plusieurs établissements comprenant les huit volées primaires, une mesure destinée à augmenter à court terme le nombre d'établissements primaires actuels aurait constitué un pas important vers la mise en place d'un cadre général propice à l'introduction d'HarmoS.

Cette augmentation aurait permis de répondre, à très court terme, par un déplacement des frontières actuelles pour passer de cinq à sept zones de recrutement, à la problématique du surdimensionnement des cinq établissements actuels. Elle aurait également permis peut-être, à court terme, d'offrir les conditions d'un meilleur « empilage » des établissements primaires et secondaires, donc d'une meilleure coordination verticale entre les établissements primaires et les établissements mixtes 6-11.

Dernier élément important en faveur d'un passage de cinq à sept établissements primaires: cette solution aurait permis le maintien d'une approche pragmatique de **l'organisation du parascolaire**, qui comprend actuellement quatre niveaux de prise en charge fondés sur un premier cycle de deux ans (**parascolaire I**), un deuxième cycle correspondant aux deux cycles primaires actuels (**parascolaire II**) et une prise en charge spécifique pour les futures 7^e et 8^e années (**parascolaire III**) dans le cadre des infrastructures existantes dans les actuels établissements secondaires.

Ce scénario est toutefois provisoirement mis de côté au profit des propositions et principes ci-dessous, qui constituent le fondement de la réorganisation proposée.

7. Conclusion: principes et propositions

1) *Etablissement 1-11 : une hypothèse écartée*

La mise en place d'établissements mixtes comprenant les 11 volées de la scolarité obligatoire est écartée des hypothèses de travail, en particulier en raison de la densité du tissu urbain, peu adapté à un tel découpage, de l'impossibilité d'assurer un minimum de mixité sociale, de la réalité du parc immobilier existant, des problèmes de gestion scolaire et parascolaire ainsi que des coûts supplémentaires qu'engendrerait un tel scénario.

2) *L'objectif différé*

Dans le cadre de la mise en œuvre de la LEO, la région scolaire de Lausanne devra **tendre à terme vers la mise en place d'établissements primaires comprenant les volées 1 à 8 et d'établissements secondaires 7 à 11 et 9 à 11**. Toutefois, sur la base des constats du présent rapport, cette introduction sera fondée, dans un premier temps, sur une répartition qui tient compte de la réalité du parc immobilier existant. En effet, l'adaptation de l'infrastructure aux transformations consécutives à l'application de la loi scolaire de 1984 est à peine achevée et a impliqué de très gros investissements. Elle est conçue pour abriter d'une part des établissements formés de bâtiments dispersés et dimensionnés pour accueillir les six premières volées de la scolarité, avec les structures parascolaires qui lui sont attachées, et d'autre part pour regrouper dans de grands complexes scolaires les cinq dernières volées d'élèves en âge d'effectuer de plus grands déplacements pour se rendre à l'école.

3) *Les solutions retenues*¹³

La mise en place de la loi sur l'enseignement obligatoire s'effectuera d'abord sur le principe du maintien d'établissements primaires comprenant les volées 1 à 6 de la scolarité obligatoire (actuellement classes de CIN, de CYP1 et de CYP2) et sur la transformation des établissements secondaires actuels en établissements mixtes

¹³ Voir schéma d'organisation annexé.

comprenant d'une part les deux derniers degrés primaires (7^e et 8^e, actuellement Cycle de transition 5e-6e), et les trois degrés secondaires 9^e à 11^e (actuellement voies secondaires 7^e-9^e). La localisation des classes concernées et les zones de recrutement de chaque établissement resteront inchangées.

Une **approche modulaire** de cette future organisation sera privilégiée afin de permettre, dès que possible, de tendre vers une organisation primaire 1-8, en particulier dans le contexte du développement de nouveaux quartiers formant de nouveaux bassins de population.

3) **La condition préalable à toute réorganisation**

Le préalable à toute réorganisation est **l'octroi par le DFJC à la région Lausanne d'un minimum de deux établissements supplémentaires**. Au vu des perspectives démographiques, un troisième établissement serait souhaitable. Il pourrait contribuer à faciliter une approche modulaire de la réorganisation et donc la mise sur pied d'établissements primaires 1-8, en particulier dans les quartiers en développement.

4) **Les étapes du changement**

L'hypothèse examinée en cours d'étude d'un scénario à 14 établissements permettait la création, à court terme et dans une première étape, de deux nouveaux établissements primaires 1-6 (scénario 7EP + 7ES). En raison des intentions exprimées par la DGEO de prévoir 15 établissements pour la région Lausanne, cette hypothèse est provisoirement écartée. En effet, la perspective de trois établissements supplémentaires devrait permettre d'accélérer l'étude plus détaillée d'un scénario modulaire, en vue de la création, en fonction du développement de la ville, d'un ou de plusieurs établissements primaires 1-8. Ce passage direct à une solution modulaire éviterait de figer d'emblée et pour une longue durée une structure 1-6 /7-11 sur l'ensemble de la région scolaire de Lausanne.

Dans l'attente de la décision du Conseil d'Etat d'accepter la proposition d'établissements supplémentaires et jusqu'au terme des études de faisabilité du scénario modulaire précité, la structure transitoire mise en place est celle du maintien tels quels, malgré leur taille actuelle, des 5 établissements primaires 1-6 et de la transformation des établissements secondaires actuels en établissements mixtes 7-11.

En cas de décision de limiter à deux le nombre d'établissements scolaires supplémentaires et selon l'évolution du développement de la ville ainsi que le bilan de l'expérience des futurs établissements mixtes 7-11, le scénario 7 EP 1-6 et 7 ES 7-11 pourrait être réactivé, en parallèle à celui d'une solution modulaire à 14 établissements.

8. **Perspectives et calendrier**

Le présent rapport est le résultat d'une démarche commune menée par le service des écoles primaires et secondaires avec la conférence des directeurs d'établissements lausannois (CRL).

Une lecture finale et une dernière mise au point des conclusions s'est déroulée lors d'une séance qui a réuni, le 15 décembre 2011, le conseiller municipal, directeur de la DEJCS et deux représentants de la Direction générale de la scolarité obligatoire, dont l'un des deux a suivi l'ensemble des travaux du groupe de travail.

Ce rapport a été élaboré dans un premier temps à l'intention de la Municipalité, afin qu'elle puisse prendre connaissance des enjeux et des conséquences pour Lausanne de la mise en œuvre de la nouvelle loi sur la scolarité obligatoire (LEO) et se déterminer à leur sujet, dans l'esprit de l'art 40 de la Loi sur l'enseignement obligatoire.¹⁴

Après son adoption par la Municipalité, ce rapport servira de base à une demande d'autorisation au Département d'achever la mise au point définitive du scénario proposé, qui présuppose en

¹⁴ Selon l'art. 40 LEO, al. Le DFJC peut autoriser une organisation différente du « modèle » suggérée par le concordat HarmoS, qui répartit la scolarité en 2 cycles primaires de 4 ans (1^{ère} à 8^e année), et un cycle secondaire de la 9 à la 11^e année.

particulier l'octroi des mesures nécessaires à la création de deux ou trois établissements scolaires supplémentaires pour la région scolaire de Lausanne.

Les étapes subséquentes de cette vaste opération seront les suivantes :

- Mars 2012 : envoi du rapport au Département de la formation, de la Jeunesse ;
- Examen, dès le printemps 2012, des modalités de mise en œuvre, pour la rentrée scolaire d'août 2013, de la transformation des sept établissements secondaires actuels en établissements mixtes primaires et secondaires, puis préparation de la première rentrée scolaire de la nouvelle 7^e année primaire et des structures secondaires à deux divisions ;
- Parallèlement et après réception de la décision du Conseil d'Etat, démarrage de l'étude complémentaire de faisabilité du scénario modulaire visant à la création d'un à deux établissements primaires 1-8 dans les quartiers à fort développement, en particulier, dans le quartier des Fiches et dans le futur éco-quartier ;
- Entre 2015 et 2017, selon l'état d'avancement du futur collège des Fiches, étude des modalités de mise en place d'un premier établissement primaire 1-8 ;
- Entre 2016 et 2020, selon l'état d'avancement du développement du quartier et des projets de constructions scolaires, étude des modalités de mise en place d'un second établissement primaire 1-8.

Le rapporteur du GT Horizon 2015-2020 :

Gérard Dyens

Annexes :

- Synthèse du rapport à l'intention de la Municipalité
- Cartes des zones de recrutement des établissements scolaires lausannois
- Cartes *Population scolaire et capacité scolaire* et *Bassins de population d'élèves 1-2 et 7-8*
- Schéma d'organisation

GD/ Lausanne, le 13 février 2012


**Bureau d'information
et de communication**

Rue de la Barre 2
1014 Lausanne

T + 41 21 316 05 15
F + 41 21 316 40 52
info.bic@vd.ch

• • • • •
L a u s a n n e

Service du développement de la Ville
et de la communication - Info presse
Hôtel de Ville
Case postale 6904
1002 Lausanne

T + 41 21 315 25 50
F + 41 21 315 20 10
infopresse@lausanne.ch

Communiqué de presse

Réorganisation des établissements scolaires lausannois

Trois établissements primaires de plus à la rentrée d'août 2015

A la rentrée d'août 2015, le paysage scolaire lausannois verra la création de trois nouvelles directions d'établissement scolaire primaires. En effet, l'augmentation constante du nombre d'élèves nécessite un redimensionnement des établissements. Le passage de 5 à 8 établissements primaires sera permis par la redistribution des aires de recrutement et des lieux d'enseignement et tiendra compte des grands projets de développement urbain.

Pour rappel, l'organisation actuelle des établissements scolaires lausannois en établissements primaires et en établissements « mixtes » primaire et secondaire a été établie en 2012, afin d'intégrer progressivement les mesures de la loi sur l'enseignement obligatoire (LEO) et du concordat intercantonal sur l'harmonisation de la scolarité (HarmoS). A terme, l'objectif est de créer à Lausanne des établissements accueillant l'ensemble des élèves du secteur primaire (1^{re} à 8^e). Un groupe de travail réunissant les services de la Ville de Lausanne et du Canton établira, d'ici à la fin de l'année 2014, une feuille de route concernant cet objectif.

Il y a à actuellement à Lausanne 5 établissements primaires accueillant des élèves de la 1^{re} à la 6^e année, et 7 établissements primaires et secondaires qui reçoivent les élèves de la 7^e à la 11^e année (dérogation à la LEO). Chaque établissement compte une dizaine de bâtiments et accueille en moyenne 1102 élèves pour l'année scolaire 2013-14. Pour les établissements primaires exclusivement, cette moyenne s'élève à 1436.

Or, la progression du nombre d'élèves est constante. Les cinq établissements primaires accueillait au total 5600 élèves en 1988 contre 7050 en octobre 2013. Le plus grand établissement comptera près de 90 classes et 1750 élèves en août 2014, répartis dans 10 lieux scolaires. De plus, il s'agit également de prendre en compte le développement des grands projets urbains comme le développement des quartiers des Fiches, des Plaines-de-Loup ou des Prés-de-Vidy.

Des mesures applicables à court terme ont dès lors été décidées afin de ramener les établissements primaires à une taille raisonnable en matière de gestion, de coordination et de charge de travail pour les équipes de direction. Dès la rentrée 2015, trois directions nouvelles seront créées. Les huit établissements primaires (EP) de Lausanne seront les 5 actuels, soit: EP Entre-Bois, EP Floréal, EP Mon-Repos, EP Prélaz, et EP La Sallaz, auxquels s'ajouteront: EP Beaulieu, EP Coteau-Flauri, et EP Pierrefleur. Pour les élèves et leurs parents, ces changements d'ordre organisationnels n'auront une incidence que sur le plan administratif, les lieux d'enseignement restant inchangés.

Bureau d'information et de communication de l'Etat de Vaud
Service du développement de la Ville et de la communication

Lausanne, le 13 mai 2014

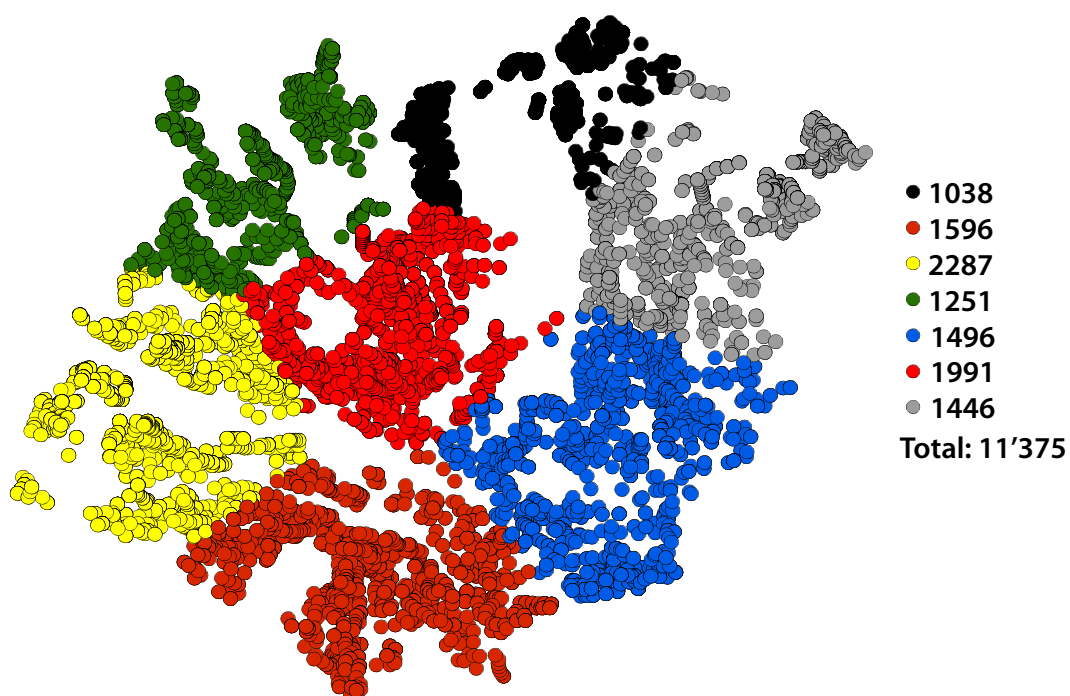
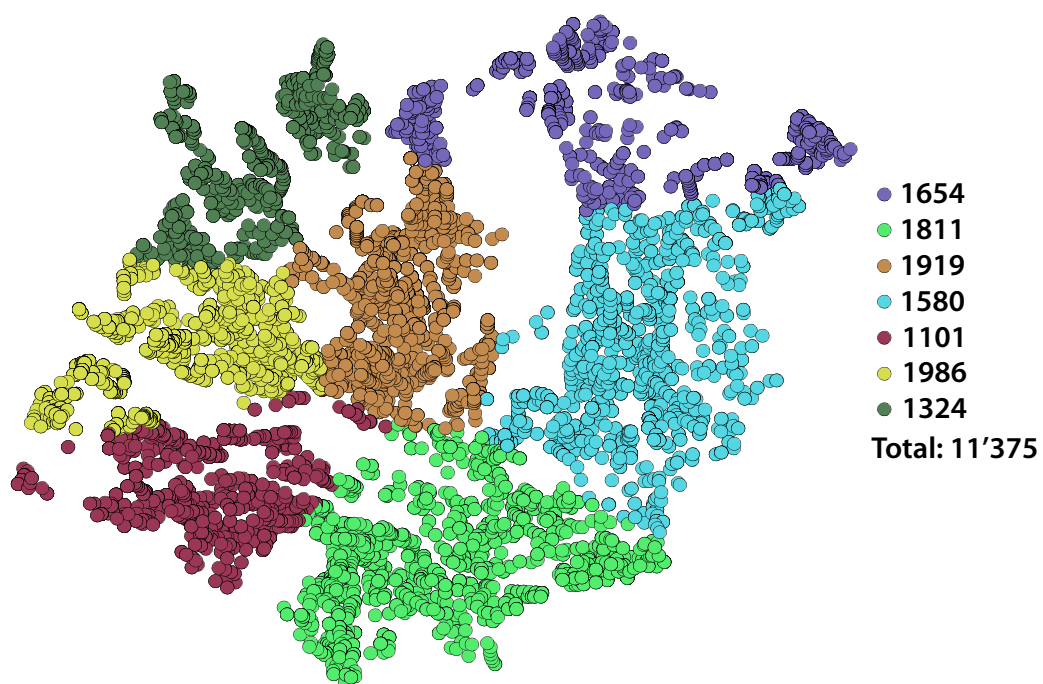
Renseignements complémentaires:

Anne-Catherine Lyon, cheffe du Département de la formation, de la jeunesse et de la culture, 021 316 30 01
Oscar Tosato, directeur de l'enfance, de la jeunesse et de la cohésion sociale, 021 315 62 00
Alain Bouquet, directeur général de l'enseignement obligatoire, 021 316 32 01
Philippe Martinet, chef du service communal des écoles primaires et secondaires, 076 368 10 41

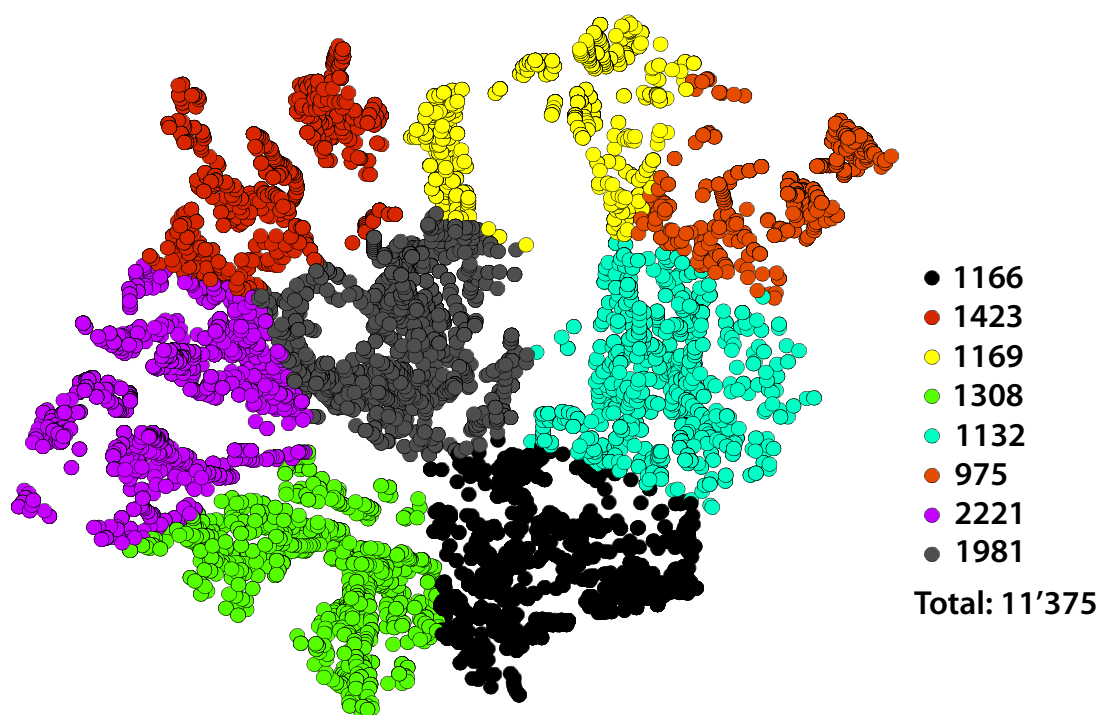
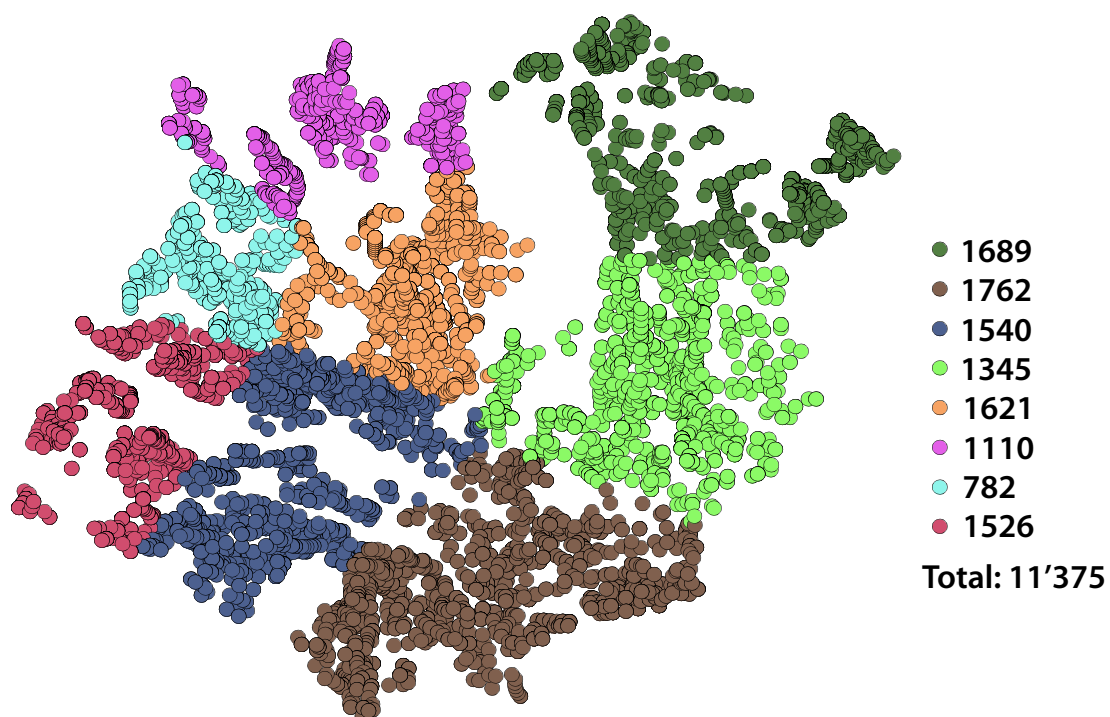
Appendix C

Limites d'établissements par k-means (T.E, 2011)

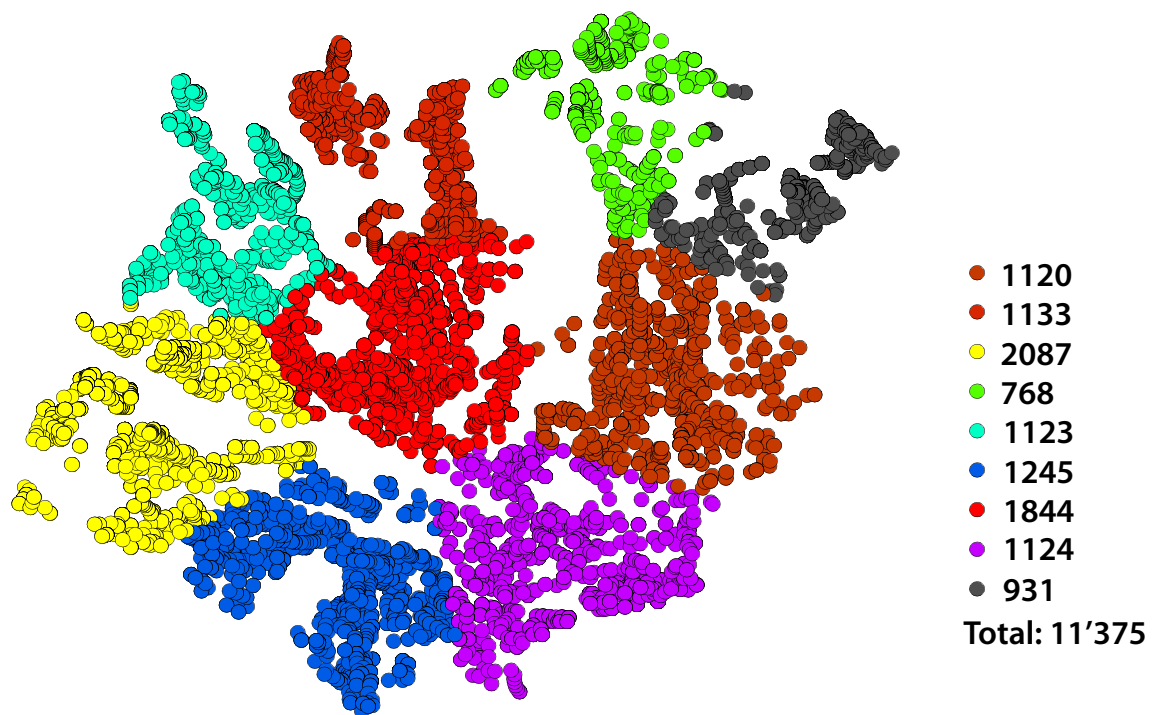
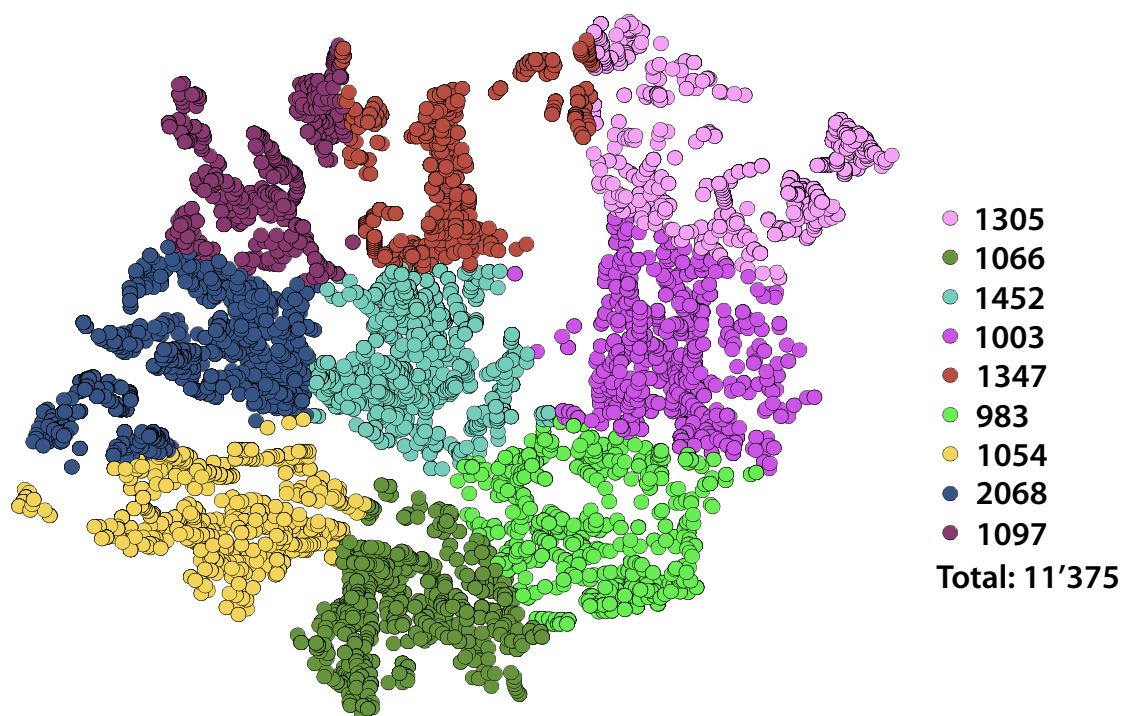
Délimitation de 7 établissements par traitement informatique (clustering)



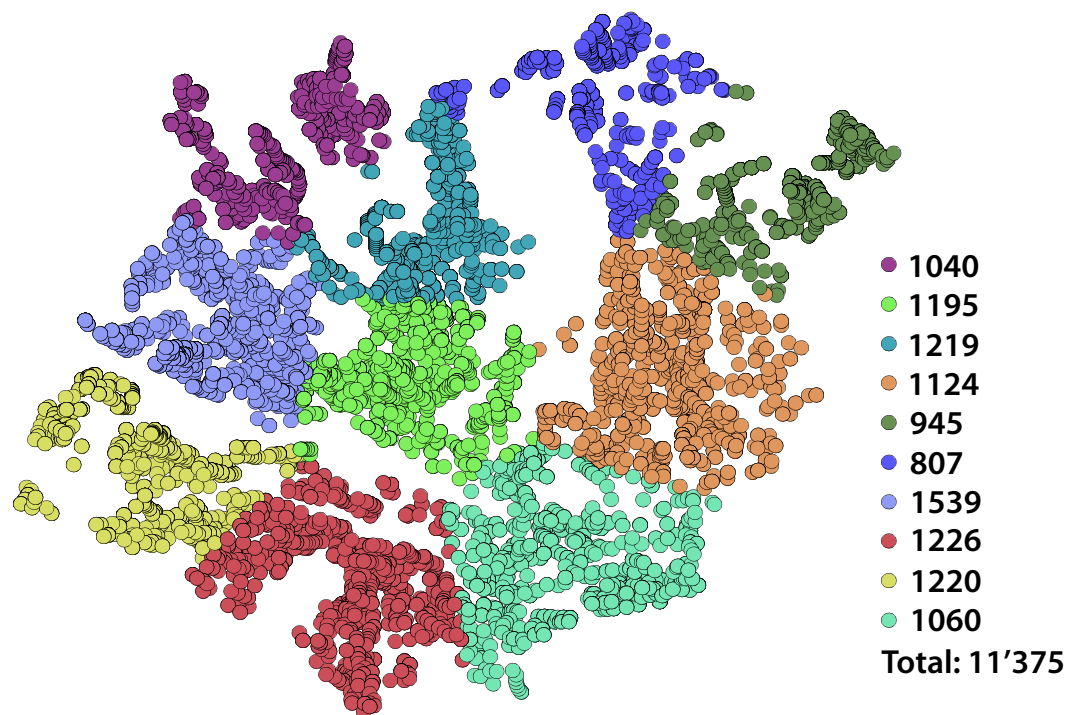
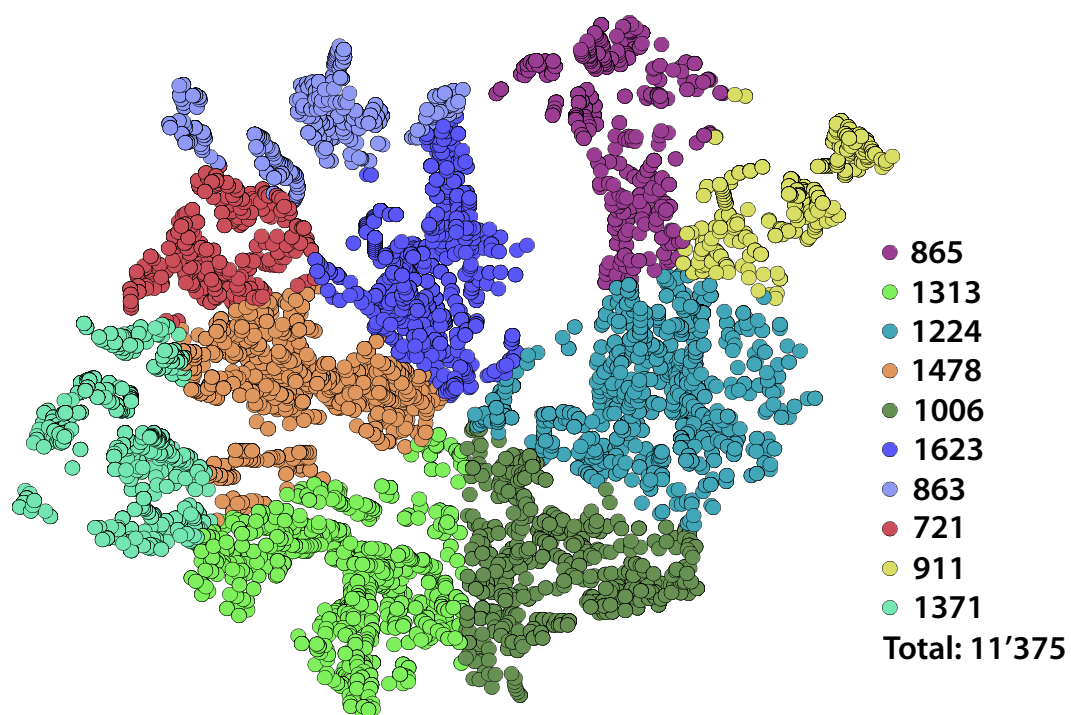
Délimitation de 8 établissements par traitement informatique (clustering)



Délimitation de 9 établissements par traitement informatique (clustering)



Délimitation de 10 établissements par traitement informatique (clustering)



Appendix D

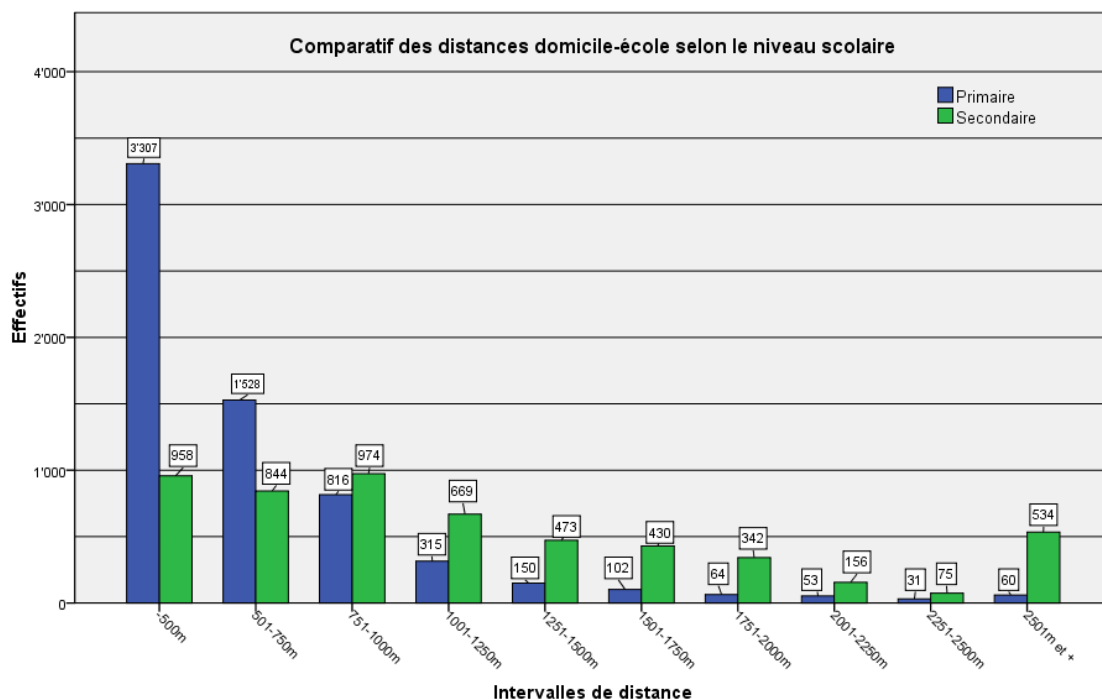
Étude des établissements scolaires primaires lausannois (T.E, 2011)

Etude des établissements scolaires primaires lausannois

Le but de la présente étude est double : il s'agit premièrement de comprendre l'état d'équilibre régnant actuellement au sein et entre les différents bassins de recrutement primaires. Dans un deuxième temps, ce document suggère différents scénarios de découpage pour la mise en place de nouveaux établissements.

Emmanouilidis Théophile (janvier 2011)

Ce travail fait suite à la réalisation d'une analyse statistique et spatiale des établissements scolaires secondaires. Le but de la présente étude est de mieux comprendre l'état d'équilibre existant actuellement sur la base de données datant de novembre 2010. L'approche statistico-spatiale choisie pour explorer et analyser le secteur scolaire primaire diffère de celle menée pour le secondaire. En effet, la politique menée depuis de nombreuses années par la direction des écoles vise à favoriser la proximité des bâtiments scolaires pour les jeunes élèves (jusqu'au CYP2). C'est ainsi qu'environ 88% des écoliers de niveau primaire ont une distance domicile-école inférieure à 1km alors qu'ils sont 51% au niveau secondaire. Le graphique et le tableau ci-dessous donnent le détail de la situation.



Distance domicile-école	-500m	501-750m	751-1000m	1001-1250m	1251-1500m	1501-1750m	1751-2000m	2001-2250m	2251-2500m	2501m et +
% Primaire	51.46%	23.78%	12.70%	4.90%	2.33%	1.59%	1.00%	0.82%	0.48%	0.93%
% primaire cumulatif	51.46%	75.24%	87.94%	92.84%	95.18%	96.76%	97.76%	98.58%	99.07%	100.00%
% Secondaire	17.56%	15.47%	17.86%	12.26%	8.67%	7.88%	6.27%	2.86%	1.37%	9.79%
% secondaire cumulatif	17.56%	33.03%	50.89%	63.15%	71.82%	79.71%	85.98%	88.84%	90.21%	100.00%

En termes de distance, la distance moyenne domicile-école des 6'426 élèves est d'environ 614m. La distinction entre les cycles scolaires montre que la distance moyenne du CYP1 est la plus basse avec 577m, alors que le CYP2 est de 644m¹.

Distance moyenne domicile-école [m]		
CIN	CYP1	CYP2
622	577	644

Au niveau de l'aménagement du territoire, la politique de proximité se traduit par 41² bâtiments scolaires de tailles variées, et disséminés sur l'ensemble du territoire qui accueillent dans l'année

¹ L'annexe 1 détaille les distances moyennes des écoliers pour chaque établissement et pour chaque bâtiment scolaire.

2010-2011 6'426 élèves. Ces quelques remarques effectuées, venons-en à quelques chiffres sur les cinq bassins de recrutement primaires.

Zones de recrutement et population

	Population (08) (hab.)	%	Surface du bassin (km2)	%	Densité de pop. (hab/km2)
Entrebois	~ 25'000	19.7%	3.34	17.9%	7'489
Floréal	~ 25'500	20.1%	4.56	24.4%	5'592
Mon-Repos	~ 33'000	26.0%	4.70	25.2%	7'017
Prélaz	~ 29'000	22.8%	2.91	15.6%	9'954
Sallaz	~ 14'500	11.4%	3.16	16.9%	4'596
Total	~ 127'000	100.0%	18.67	100.0%	

Sur la base des données (2008) du SCRIS, une évaluation de la population au sein des 5 bassins de recrutement a été effectuée. Il en ressort que Mon-Repos est le plus peuplé (33'000 hab.) suivi de Prélaz (29'000 hab.). En termes de surface, Mon-Repos couvre le quart du territoire Lausannois (25.2%) alors que Prélaz est le plus petit (15.6%). De plus, notons que les établissements de Floréal et de Mon-Repos s'étendent sur tout le Sud et le Sud-Est de la ville : ils couvrent quasiment la moitié de la surface de la ville. Entrebois et Floréal ont une population similaire avec environ 25'000 habitants. L'établissement de la Sallaz ferme la marche en comptant 14'500 résidents (à noter que les zones foraines de Montblesson, Châlet-à-Gobet, et V-C-L-B sont rattachées à cet établissement, mais n'ont pas été comptabilisées ici).

Zones de recrutement et effectifs

	Nbr d'élèves (2010-2011)	%	Nbr. de bâtiments scolaires	Nbr. de classes (2009-2010) (CIN/CYP1/CYP2)
Entrebois	1316	20.5	9	71
Floréal	1281	19.9	9	68
Mon-Repos	1358	21.1	9	70
Prélaz	1362	21.2	8	76
Sallaz (y.c. VCLB)	1109	17.3	6	61
Total	6426	100.0	41	346

Les 6'426 élèves sont répartis dans les 5 établissements de manière assez homogène, et ceci malgré des bâtiments de taille passablement variable. On notera toutefois que la Sallaz accueille 1109 élèves alors que les effectifs des quatre autres se situent aux alentours de 1300 individus. Ces effectifs peuvent sembler importants à comparer de ceux du niveau secondaire. Cela est dû aux faits que le nombre d'établissements primaires est moindre (5 contre 7 pour le secondaire) et l'effectif total plus important (6'426 élèves contre 5'532). Un scénario de 7 établissements primaires permettrait théoriquement de descendre au-dessous de 1000 élèves par établissement. Toutefois,

² Ce nombre peut changer selon la manière de compter. Ici Entrebois et le pavillon d'Entrebois ont été comptés comme une seule entité, de même que les trois « bâtiments » du Pont-des-Sauges (cf. liste des bâtiments en annexe 2).

l'homogénéité actuelle des effectifs ne permet de redéfinir un établissement qui serait trop grand ou trop petit.

Répartition des élèves au sein des bassins de recrutement

Les tableaux suivants illustrent la répartition des élèves selon les différents bassins de recrutement. Sur les 6'426 écoliers, 5'800 (soit ~90%) sont scolarisés dans l'établissement correspondant à leur lieu de domicile. Le pourcentage le plus élevé est celui de Prélaz (94%), suivi par Floréal, Mon-Repos (92%) et Entrebois (90%). À noter que le taux le plus faible est celui de l'établissement de la Sallaz avec environ 81%. Cela s'explique par le fait que les zones foraines ne disposent pas de bassin de recrutement, et que 134 élèves (sur 137) y habitant sont scolarisés dans l'établissement de la Sallaz.

	Nbr d'élèves habitant	Dans bassin	% dans bassin	Hors bassin	% hors bassin
Entrebois	1387	1256	90.56%	131	9.44%
Floréal	1305	1205	92.34%	100	7.66%
Mon-Repos	1262	1161	92.00%	101	8.00%
Prélaz	1367	1286	94.07%	81	5.93%
Sallaz	1105	892	80.72%	213	19.28%
Total	6426	5800	90.26%	626	9.74%

Ces résultats montrent que la répartition des élèves primaires au sein des établissements est plus qu'acceptable. Une étude spatiale plus approfondie de la répartition des écoliers serait sans doute superflue. Toutefois, une brève analyse a été menée pour visualiser les différents « flux » entre les zones de recrutement. Le tableau ci-dessous apporte plus de détails en mettant en rapport « l'établissement de domicile » et « l'établissement de scolarisation ». Il y a par exemple 1387 écoliers qui habitent dans la zone d'Entrebois, et 1256 d'entre eux sont scolarisés dans un bâtiment scolaire de l'établissement d'Entrebois.

		Nbr d'élèves scolarisés dans l'établissement de ..					
		Entrebois	Floréal	Mon-Repos	Prélaz	Sallaz	
Nbr d'élèves habitant dans l'établissement de ...	Forains	0	0	3	0	134	137
	Entrebois	1256	8	37	58	28	1387
	Floréal	3	1205	81	15	1	1305
	Mon-Repos	6	44	1161	2	49	1262
	Prélaz	47	21	8	1286	5	1367
	Sallaz	4	3	68	1	892	968
		1316	1281	1358	1362	1109	6426

Bien que non cartographiés ici, il s'avère que les flux interbassins se situent essentiellement en bordure de zone. À titre indicatif, des effets de bords ont été remarqués dans les quartiers suivants (« → » indique un flux unidirectionnel, p.ex « Entrebois → Sallaz » évoque des élèves résidant dans l'établissement d'Entrebois mais scolarisé dans celui de la Sallaz):

- Floréal ↔ Mon-Repos, au niveau de l'av. d'Ouchy
- Entrebois ↔ Prélaz : av. de Beaulieu et St-Roch
- Prélaz → Entrebois : Bossons
- Entrebois → Sallaz : Clochatte

- Sallaz → Mon-Repos : Victor-Ruffy
- Mon-Repos → Sallaz : av. Montagibert

Une autre approche possible de la dynamique interbassin est résumée dans le tableau ci-dessous. Elle consiste à comptabiliser pour chaque établissement le nombre d'élève qui en sort ("OUT", c'est-à-dire le nombre d'élèves qui se rendent dans un autre établissement scolaire que celui dans lequel ils habitent), et le nombre qui en rentre ("IN"). La

	IN	OUT	Balance (IN-OUT)
Entrebois	60	131	-71
Floréal	76	100	-24
Mon-Repos	197	101	96
Prélaz	76	81	-5
Sallaz	217	76	141
Forains	0	137	-137
Total	626	626	0

variable "Balance" consiste à soustraire le nombre d'élèves rentrant au nombre sortant. Si elle est négative, l'établissement envoie plus d'élèves vers d'autre(s) établissement(s) qu'il en reçoit: il est donc en quelque sorte déficitaire. Théoriquement et de manière sans doute réductrice, on pourrait dire qu'un tel établissement a une capacité d'accueil insuffisante. Cette situation se trouve principalement dans les zones foraines (-137), à Entrebois (-71), et dans une moindre mesure à Floréal (-24) et à Prélaz (-5). À l'inverse, la Sallaz (+141) et Mon-Repos (+96) ont une balance positive.

Les quelques chiffres qui ont été mentionnés dans cette étude montrent bien que la politique de proximité scolaire pour le niveau primaire est une réussite (88% des élèves habitent à moins de 1km de leur école). Le tracé des bassins de recrutement est cohérent puisque environ 90% des écoliers sont scolarisés dans l'établissement correspondant à leur lieu de domicile. Les établissements ont toutefois des effectifs importants (plus de 1200 jeunes). La suite de l'étude (bientôt terminée) consistera à diminuer la population des établissements en proposant des scénarios à 7 ou 8 zones de recrutement. Mentionnons d'or est déjà les principes devant guider cette recherche :

- Le redécoupage des établissements primaires ne devrait pas entraver la politique de proximité menée depuis quelques décennies par la direction des écoles.
- Le processus devrait éviter de réaffecter d'un seul coup plusieurs centaines d'élèves à de nouveaux bâtiments scolaires.
- Les effectifs des établissements devraient être similaires. Il serait toutefois judicieux d'anticiper la construction des futurs grands quartiers en ville de Lausanne (Fiches, Métamorphose,...). En toute logique, les établissements contenant ces futurs quartiers pourraient avoir un nombre d'élèves inférieurs aux autres.
- Dans la mesure du possible faire coïncider les nouveaux établissements primaires avec les secondaires actuels.

Annexe 1 : Distance domicile-école moyenne selon le cycle et le bâtiment scolaire.

		Cycle scolaire		
		CIN	CYP1	CYP2
		Distance moyenne (domicile-école) [mètres]		
Entrebois	Barre	573	547	574
	Bellevaux	468	573	508
	Bois-Gentil	434	446	402
	City-Blécherette	382	364	255
	Colline	627	443	.
	Entre-Bois pav.	.	.	644
	Entre-Bois	662	587	.
	Pontaise	505	324	375
	Rouvraie	575	508	1053
	Vieux-Moulin	621	507	408
dist. moyenne: 521 mètres		Total	557	502
Floréal	Bourdonette	720	238	.
	Cour	347	380	.
	Figuers	.	.	1027
	Floréal	616	600	710
	Malley	728	541	822
	Montoie	655	606	623
	Montriond	620	509	631
	Provence	424	276	.
	Tivoli	413	414	.
dist. moyenne: 630 mètres		Total	619	494
Mon-Repos	Chailly	760	692	669
	Chandieu	420	.	.
	Chissiez	350	353	449
	Croixd'Ouchy	738	508	619
	Devin	544	398	.
	Eglantine	576	605	629
	Léman	566	.	.
	Mon-Repos	604	561	670
	Montchoisi	508	562	449
dist. moyenne: 602 mètres		Total	615	576
Prélaz	Beaulieu	626	749	619
	Bergières	810	.	.
	Chablière	280	.	.
	Jardins-de-Prélaz	310	.	.
	Pierrefleur	697	674	704
	Pont-des-Sauges	452	479	324
	Prélaz	528	498	523
	Valency	505	437	.
dist. moyenne: 587 mètres		Total	567	599
Sallaz	Boissonnet	886	728	672
	Coteau-Fleuri	566	585	613
	Montolieu	325	.	.
	Praz-Séchaud	262	.	.
	Sallaz	1038	767	911
	VCLB	1231	1140	1219
dist. moyenne: 757 mètres		Total	788	740

Annexe 2 : liste des établissements et des bâtiments primaires

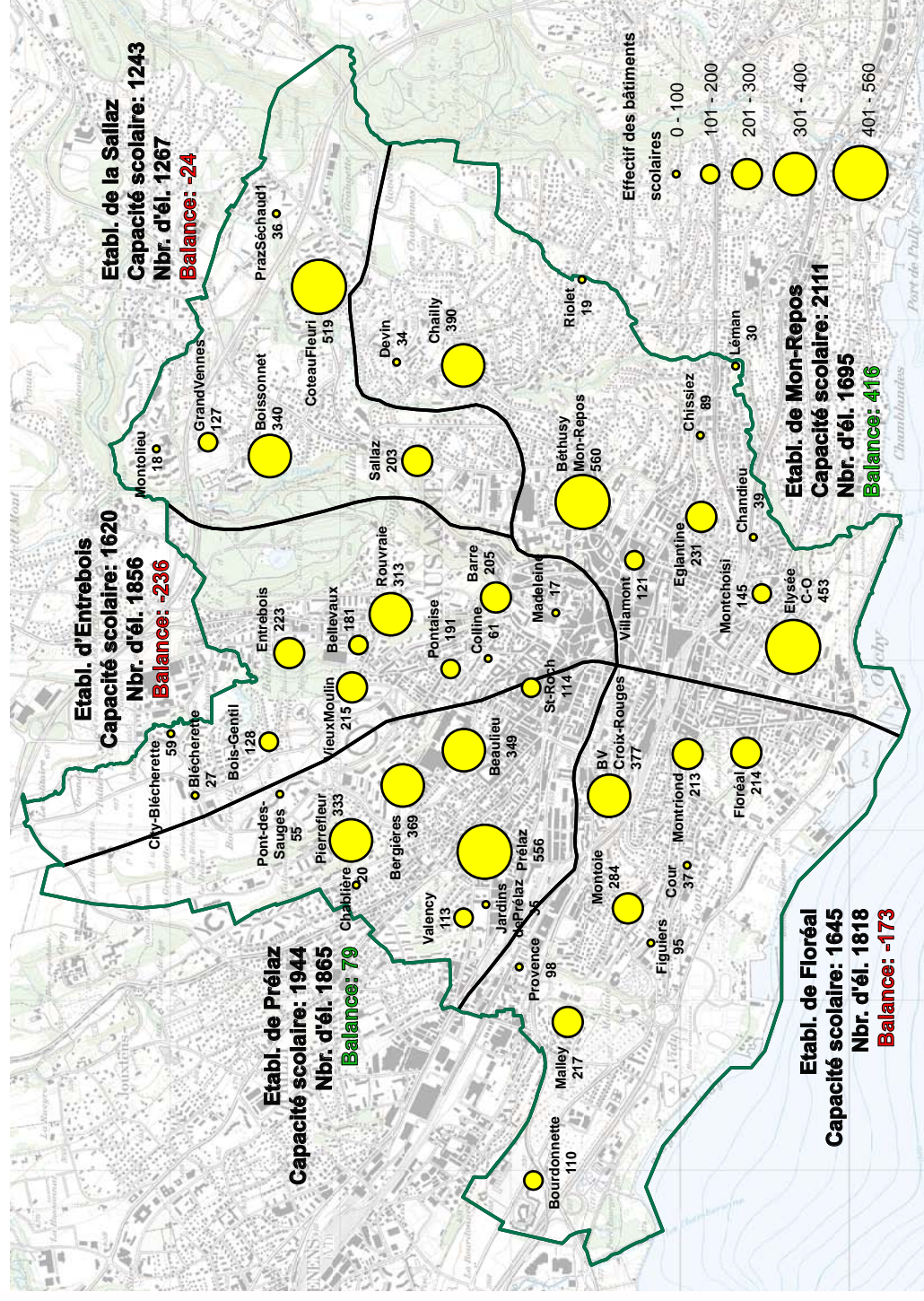
<p>Etablissement primaire de Lausanne de Floréal (9 bâtiments)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collège de Floréal • Collège de la Bourdonnette • Collège de la Cour • Collège de Malley - Bâtiment primaire • Collège de Montoie • Collège de Montriond • Collège de Provence • Collège de Tivoli • Collège des Figuiers 	<p>Etablissement primaire de Lausanne de Prélaz (8)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collège de Beaulieu • Collège de la Chablière • Collège de Pierrefleur • Collège de Prélaz • Collège de Valency • Collège des Bergières • Collège du Pont-des-Sauges 25 • Collège du Pont-des-Sauges 51 • Collège du Pont-des-Sauges 53 • Jardins de Prélaz
<p>Etablissement primaire de Lausanne de la Sallaz (6)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collège de Boissonnet • Coteau-Fleuri • La Sallaz • Montolieu • Praz-Séchaud 1 • V-C-L-B 	<p>Etablissement primaire d'Entre-Bois (9)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collège de Bellevaux • Collège de City-Blécherette • Collège de la Barre • Collège de la Colline • Collège de la Pontaise • Collège de la Rouvraie • Collège d'Entre-Bois • Pavillon d'Entre-Bois • Collège du Bois-Gentil • Collège du Vieux-Moulin
<p>Etablissement primaire de Lausanne de Mon-Repos (9)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collège de Chailly • Collège de Chandieu • Collège de Chissiez • Collège de la Croix-d'Ouchy • Collège de l'Eglantine • Collège de Mon-Repos • Collège de Montchoisi • Collège du Devin • Collège du Léman 	

Appendix E

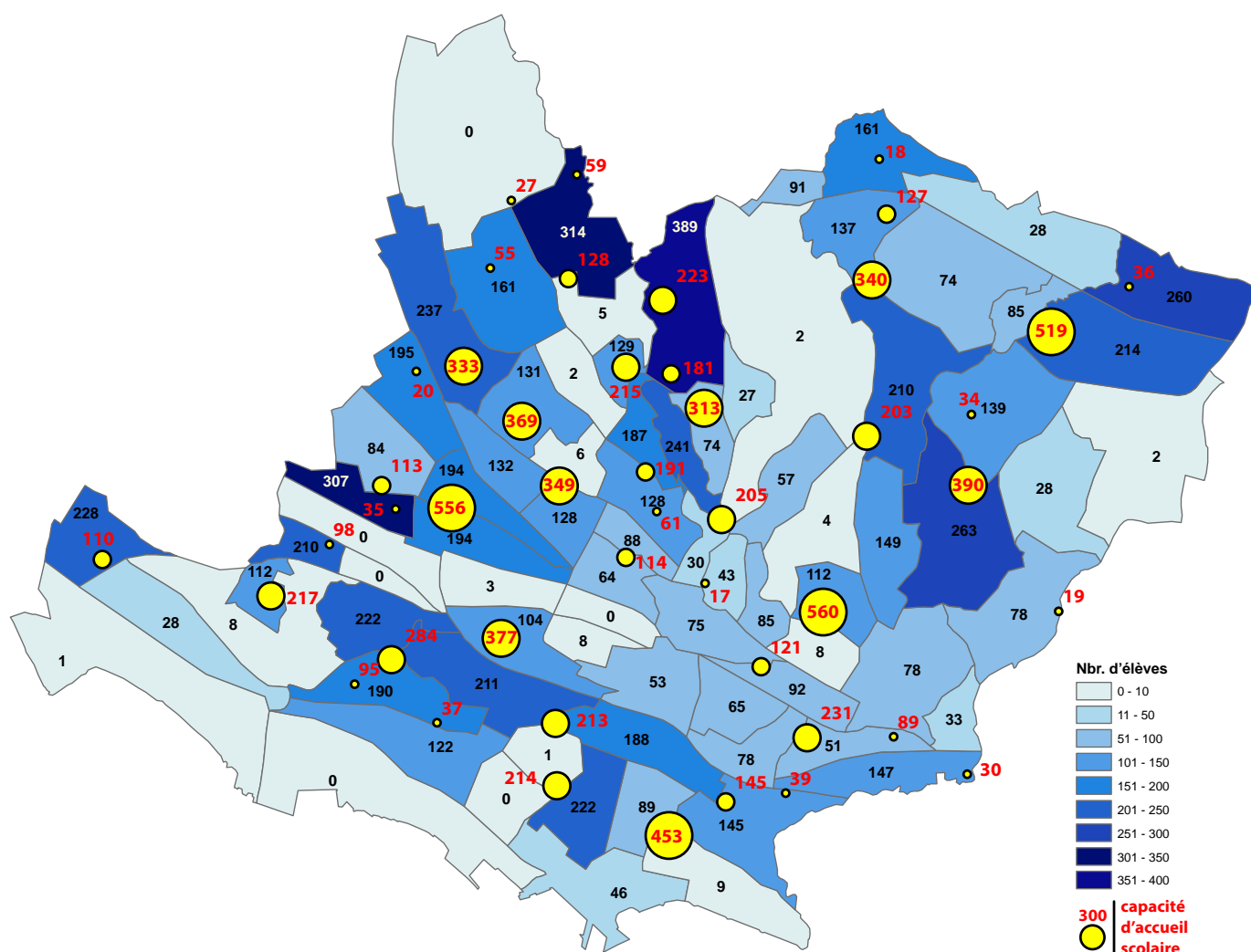
Scénarios et esquisses d'établissements Harmos 1-8 (T.E, 2012)

Bassins de recrutement primaires actuels et effectifs Harmos 1-8

Cette carte utilise le découpage des établissements primaires actuels et y ajoute les effectifs et les bâtiments des CYT5 et 6. La capacité scolaire correspond au nombre d'élèves fréquentant les bâtiments de chaque établissement. Le nombre d'élève relate le nombre d'écouliers habitant dans chacun des établissements. L'indicateur «balance» consiste à soustraire ce nombre à la capacité scolaire. Ainsi, une balance négative indique un nombre de place insuffisant. Ce phénomène est principalement visible dans les établissements d'«Entrebois» et de «Floréal» qui s'avèrent ici passablement similaires. A l'inverse l'établissement de «Mon-Repos» affiche une balance fortement positive. Cela signifie que le bassin de recrutement est trop petit ou «mal orienté». Par ailleurs, on notera que la balance totale vaut +68 à cause de quelques élèves des zones foraines de niveau CYT scolarisés principalement à Béthusy. Il est important de mentionner et de rappeler que les bâtiments accueillant des CYT sont peu nombreux (environ une dizaine), mais de grande capacité. Il s'ensuit que la plupart d'entre eux ont des zones d'affluence relativement étendues et qui pourraient s'étendre bien au-delà des limites présentes ici. De plus, l'échelle d'analyse est générale, puisqu'elle met tous les niveaux scolaires dans «le même panier».



Bassin de population scolaire et capacité d'accueil selon les quartiers statistiques Harmos année 1-8 (8'501 élèves)



Le but étant de tracer de nouveaux établissements scolaires, il convient de relater l'emplacement de la population scolaire et de la mettre en relation avec la capacité des différents bâtiments.

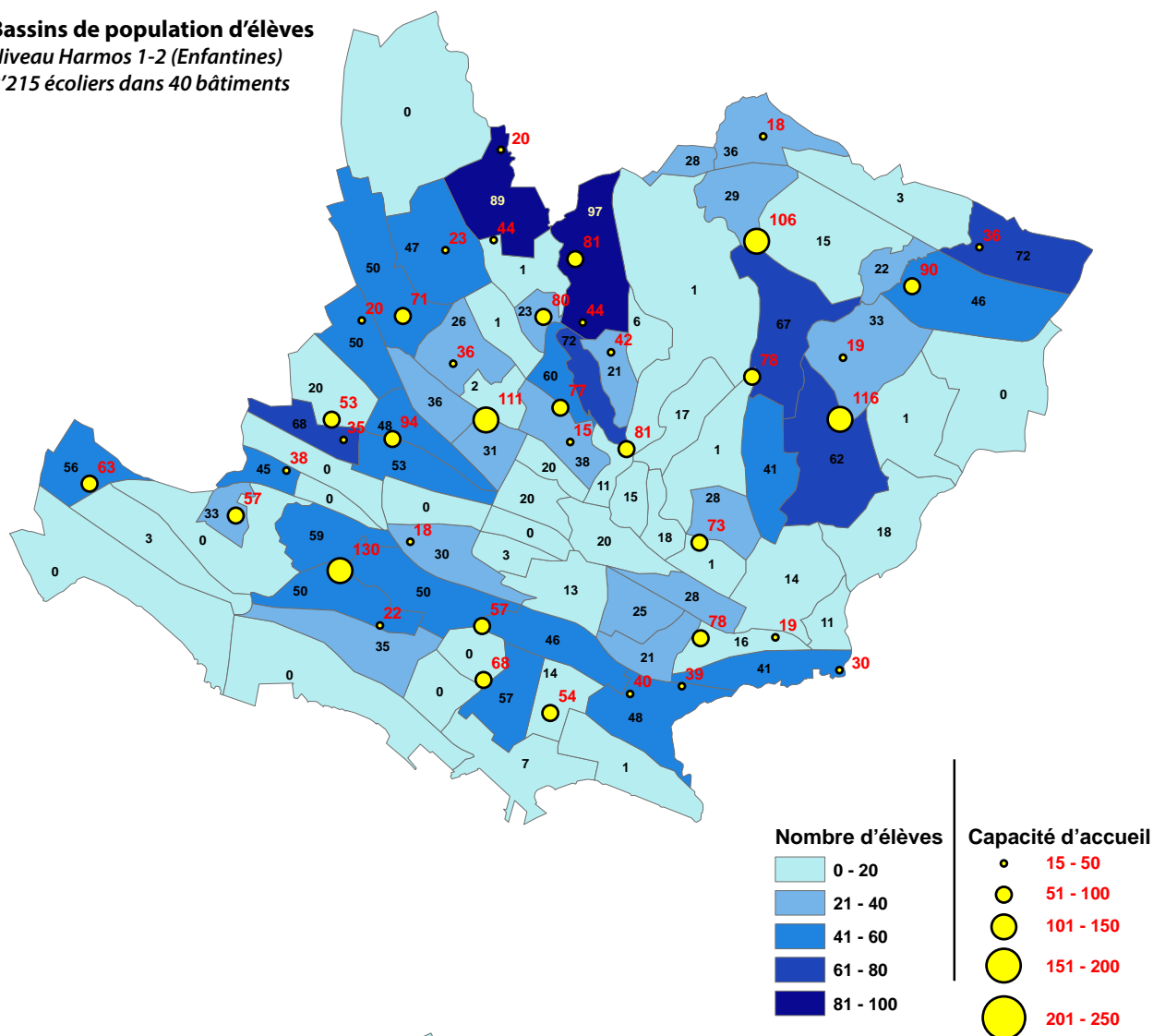
Ce document illustre la répartition de la population scolaire de l'école enfantine à la 6ème année (CYT2). La population est donnée en nombre d'individu et non sous forme de densité. Cela permet de mieux saisir globalement le lien entre un bassin de population et la capacité d'accueil des bâtiments scolaires (nombre de places actuellement occupées).

Au niveau de la population, on ne peut que remarquer l'hétérogénéité régnant sur le territoire. Les valeurs les plus fortes sont situées à l'Ouest (Prélaz, Pierrefleur) et au Nord de la ville (Bois-Gentil, Bellevaux). Le centre-ville apparaît comme relativement peu peuplé à comparer du reste de la ville. Le Sud est marqué par plusieurs discontinuités du cadre bâti (zones vertes, cimetière) et reste relativement peuplé, particulièrement dans les quartiers à la Bourdonnette, à Malley, à Montelly et dans les quartiers sous-gare. À l'Est, on peut remarquer que les effectifs sont relativement élevés à Praz-Séchaud/Grangettes, à Chailly/Sallaz, mais qu'ils s'étendent sur des zones plus grandes qu'à l'Ouest (ce phénomène est plus visible sur la carte intitulée «Densité d'élèves Harmos 1-8 selon les quartiers statistiques»).

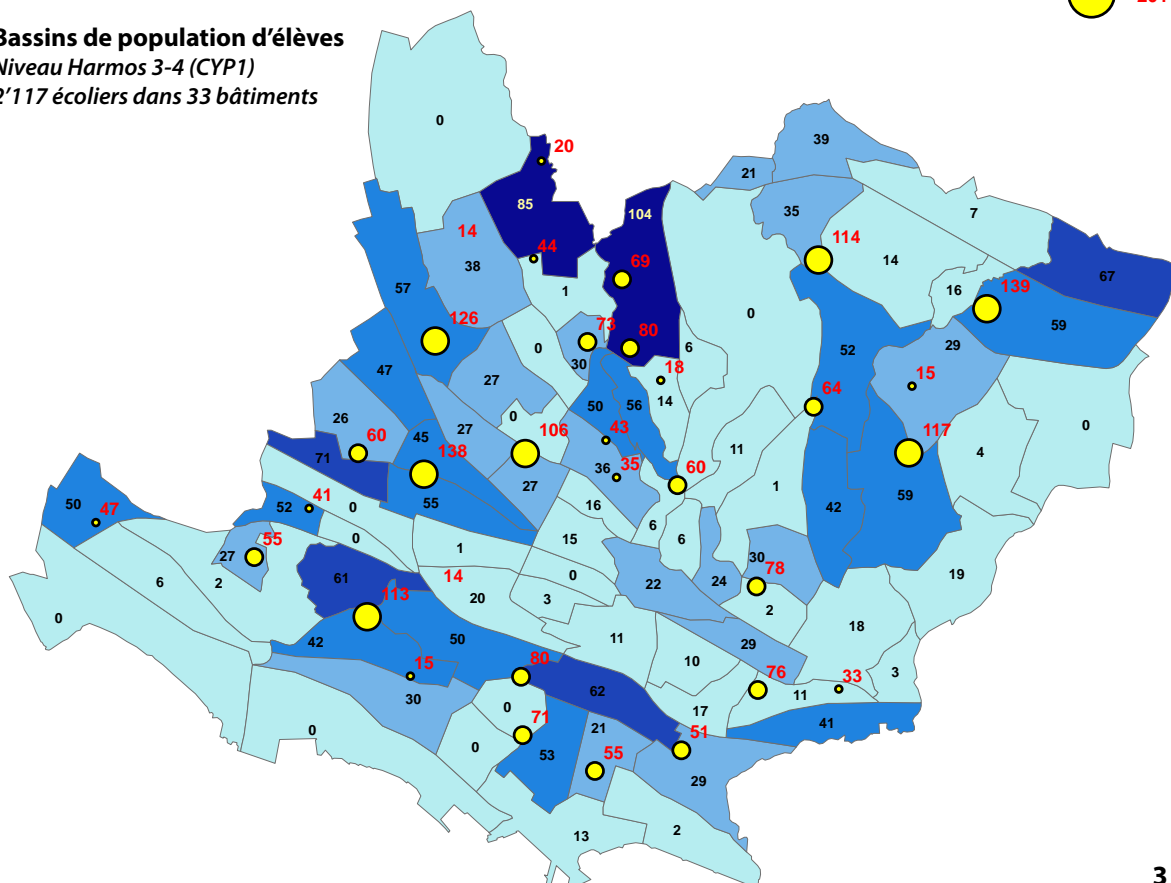
D'une certaine manière cela se répercute au niveau de la capacité d'accueil. En effet, on observe à l'Ouest des bâtiments de moyenne et de grande tailles plus espacés les uns des autres que ceux de l'Est (p.ex Pierrefleur/Bergières/Prélaz/Beaulieu). S'il est relativement difficile de faire un lien précis entre capacité d'accueil et l'effectif des quartiers, on notera que le couple Béthusy/Mon-Repos représente la capacité maximale avec ses 560 places, mais il est situé dans une zone relativement peu peuplée. Ceci signifie que sa zone de recrutement sera relativement grande.

Cette carte reste toutefois générale car elle mélange tous les niveaux scolaires. Les documents suivants permettent d'affiner l'analyse en exposant la situation par tranches de 2 années scolaires.

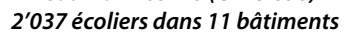
Bassins de population d'élèves
Niveau Harmos 1-2 (Enfantines)
2'215 écoliers dans 40 bâtiments



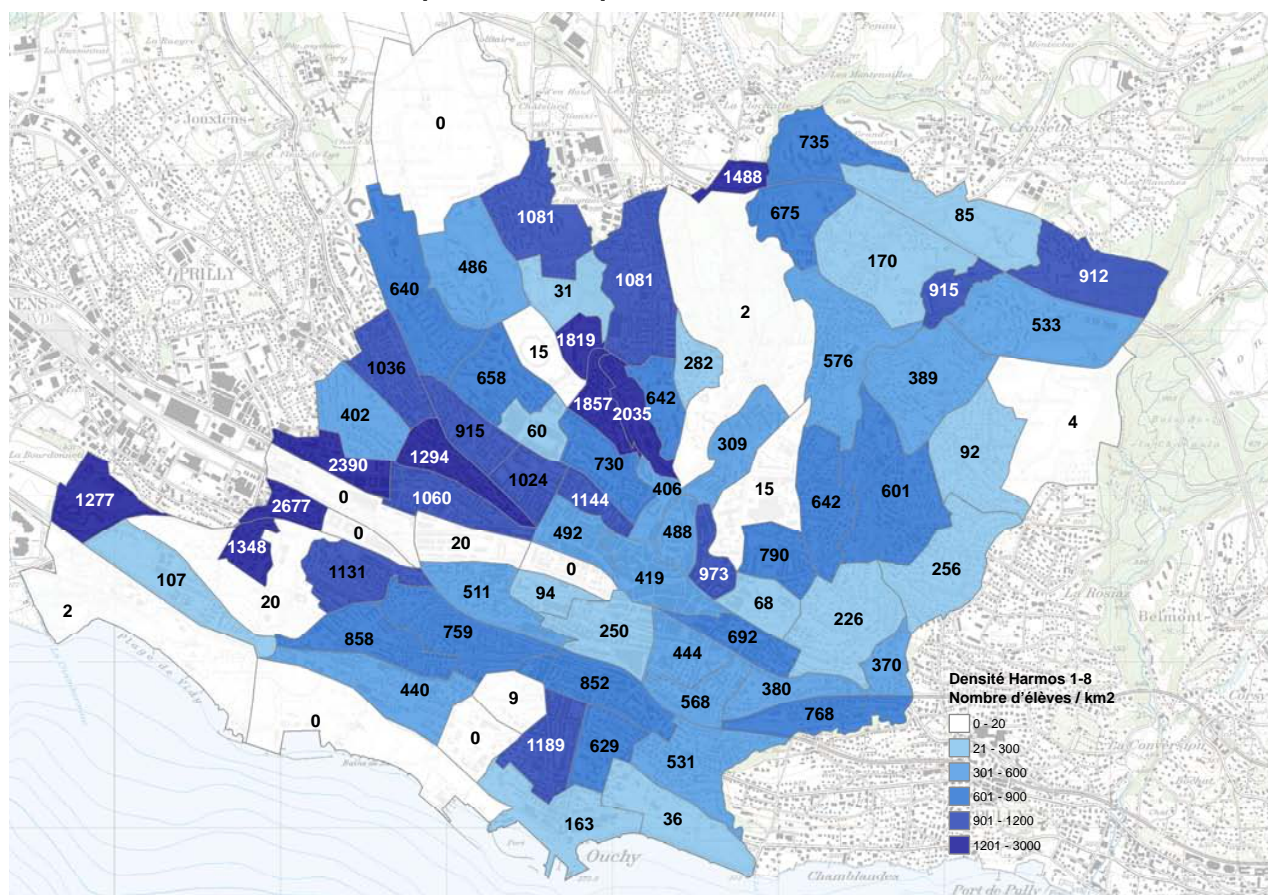
Bassins de population d'élèves
Niveau Harmos 3-4 (CYP1)
2'117 écoliers dans 33 bâtiments



2'094 écoliers dans 27 bâtiments

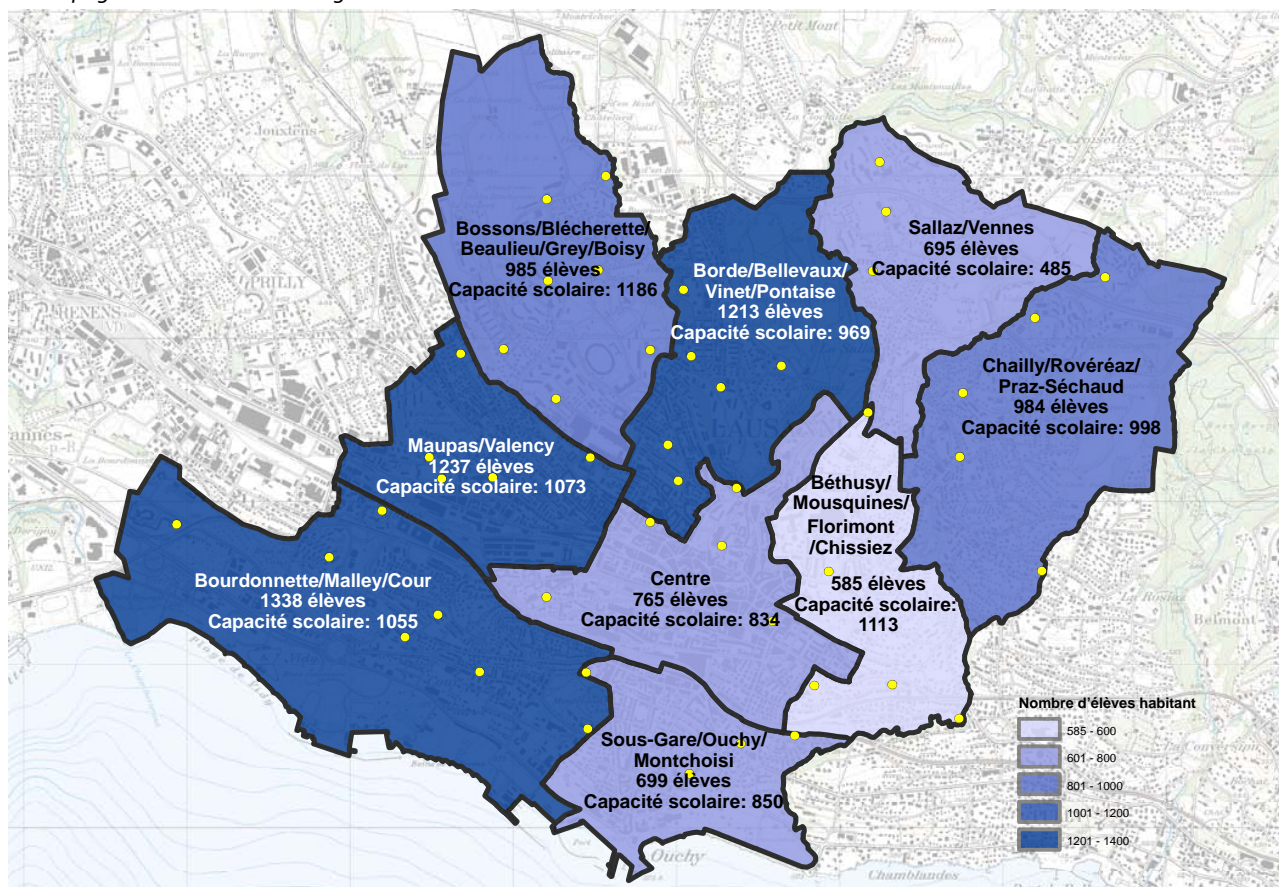


Densité d'élèves Harmos 1-8 selon les quartiers statistiques

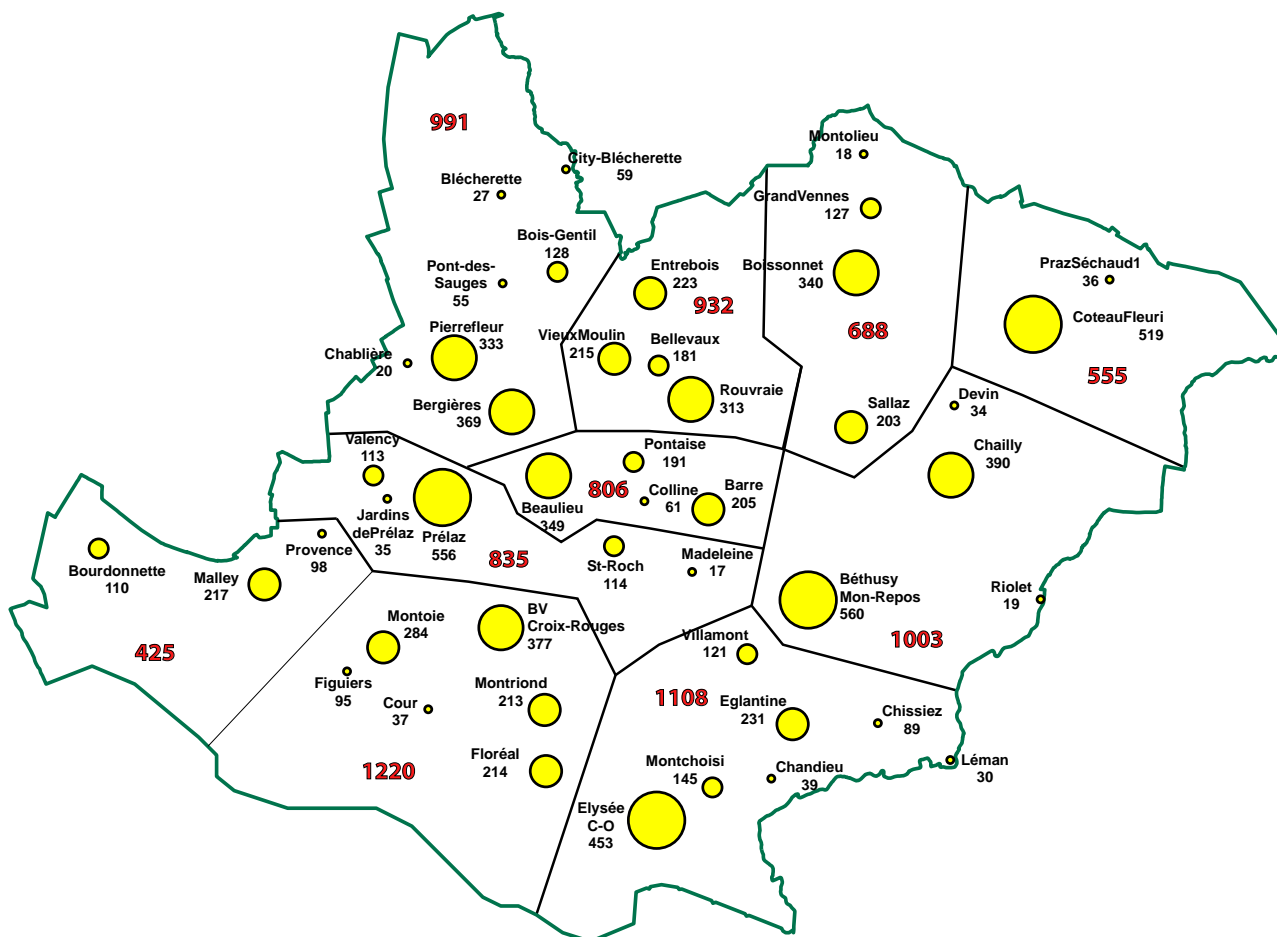
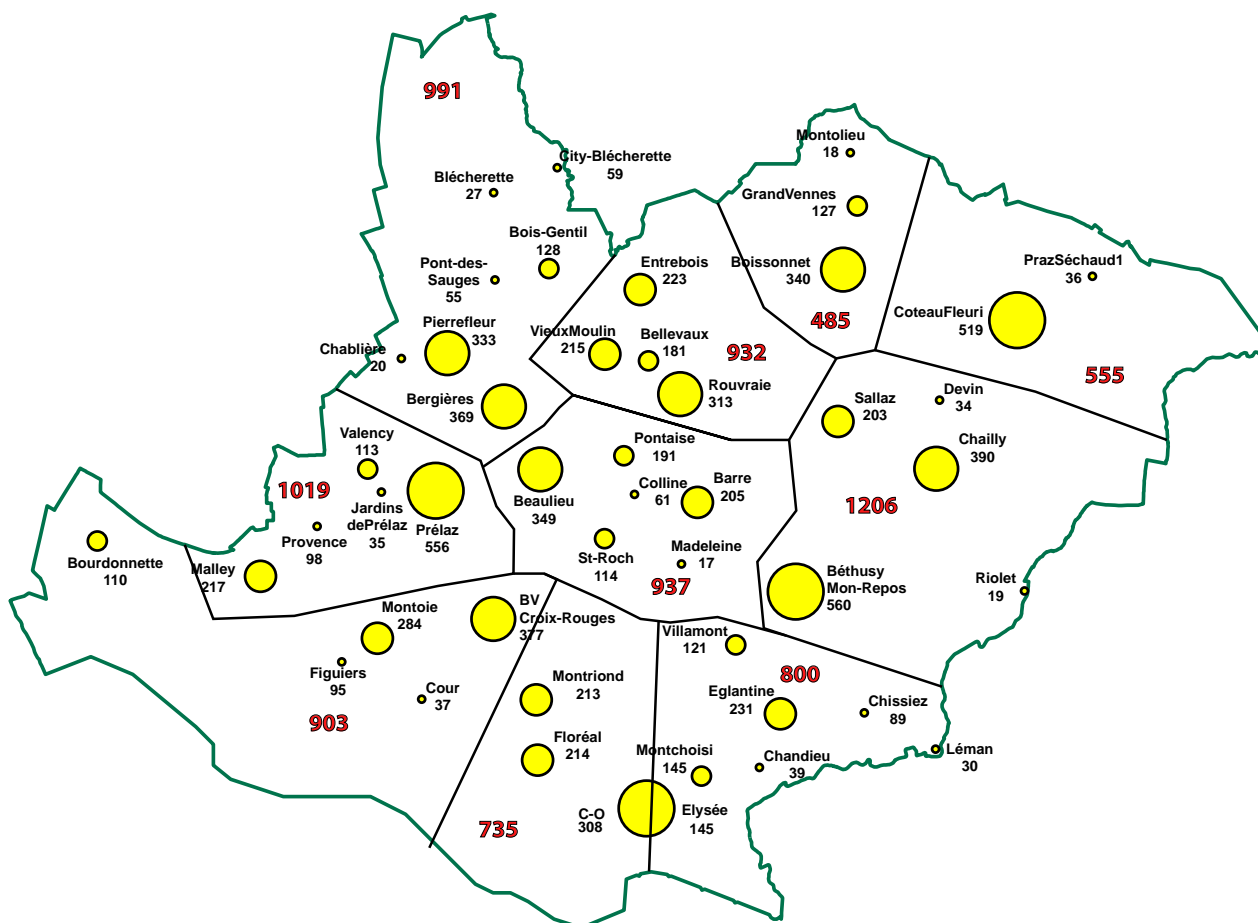


Population scolaire résidente et capacité scolaire

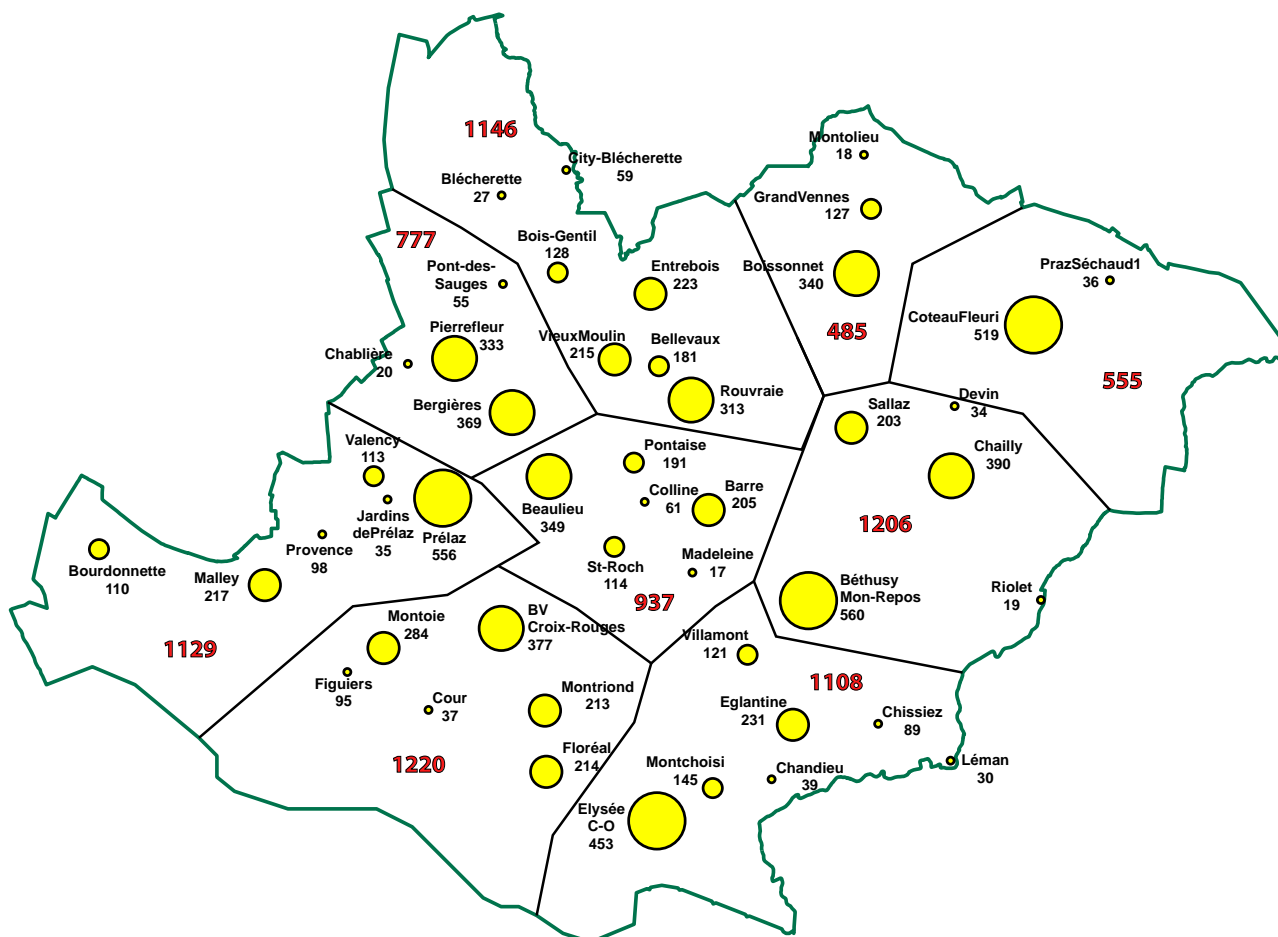
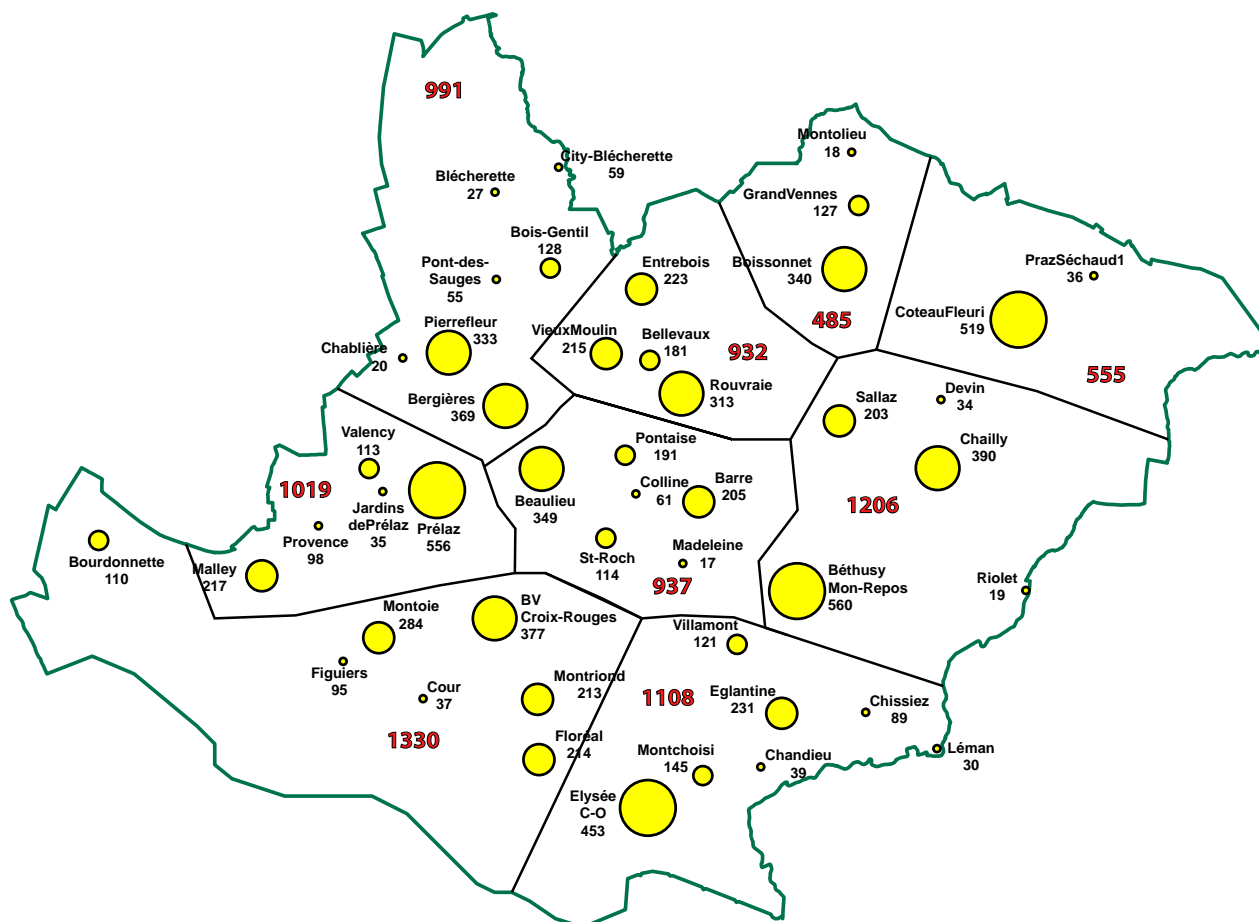
Découpage selon délimitation d'Agenda 21



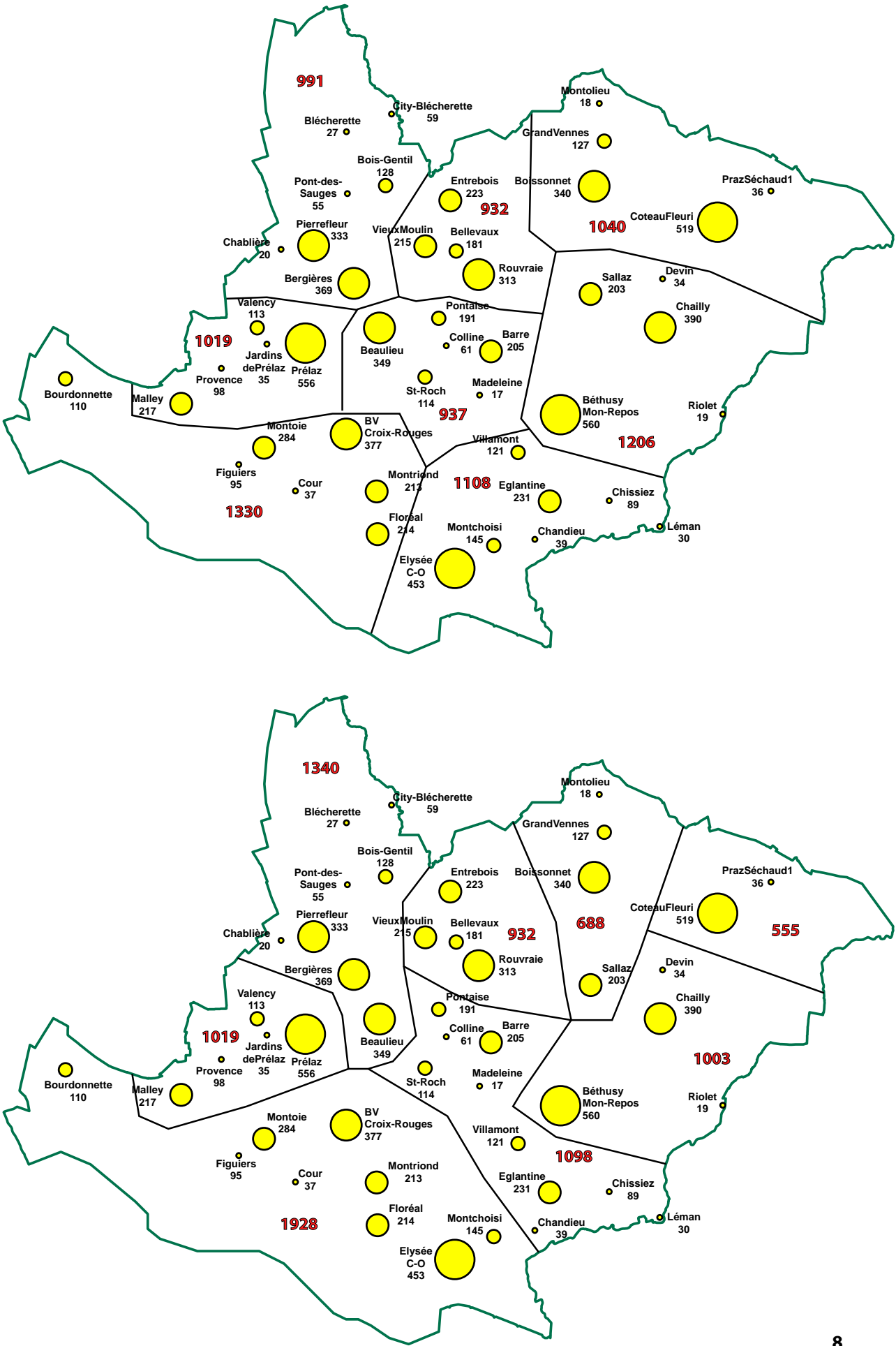
10 établissements Harmos 1-8



9 établissements Harmos 1-8

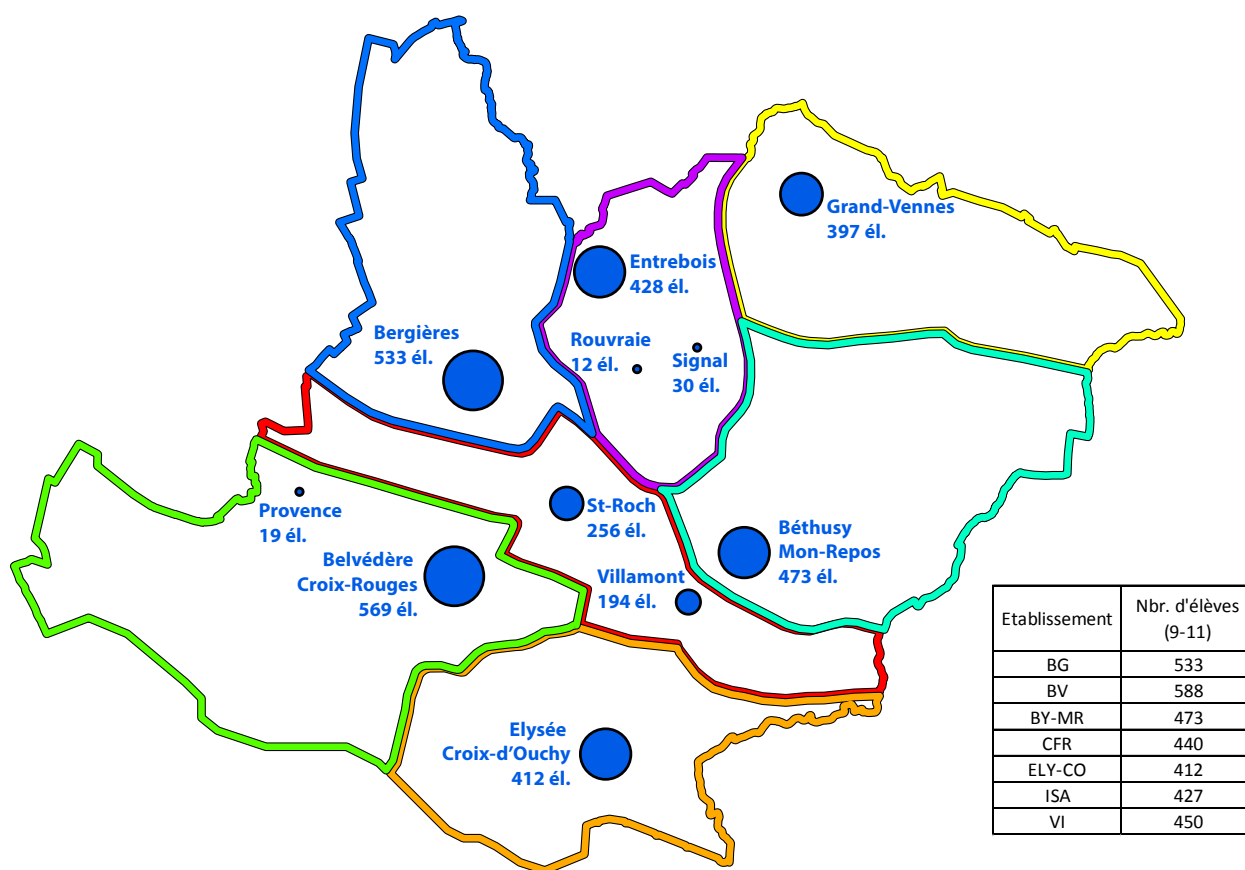


8 établissements Harmos 1-8

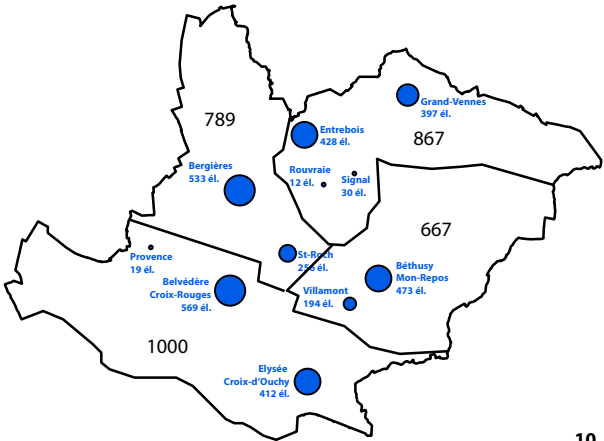
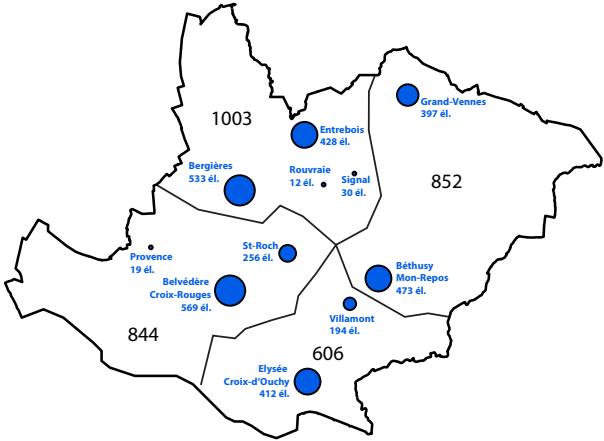
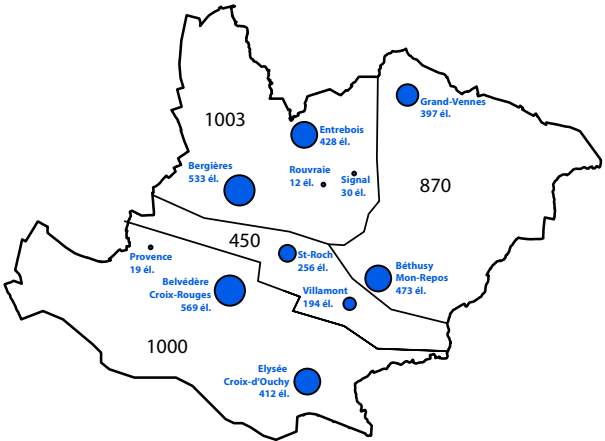
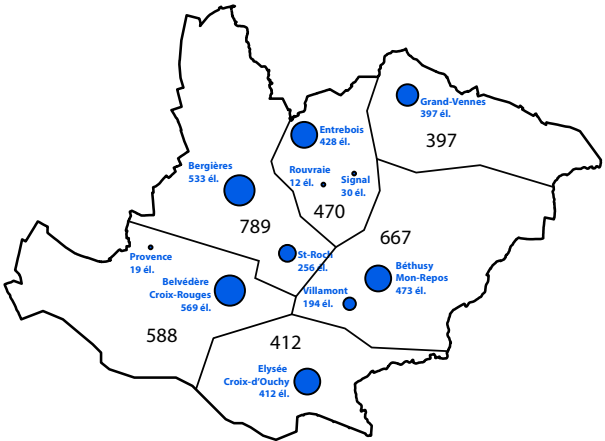


Effectifs Harmos 9-11 des bâtiments scolaires selon l'enclassement actuel

Cette carte illustre la répartition des 3'342 élèves (dont 19 à V-C-L-B) des trois années secondaires (7-9ème). Les effectifs contiennent les VSO, VSG et VSB, ainsi que les classes de raccordement et les classes spéciales (DES, SE, VER). On remarque que selon le tracé des 7 établissements actuels, les effectifs sont relativement bien équilibrés puisqu'ils oscillent entre 412 (étab. de l'Elysée) et 588 élèves (étab. du Belvédère), et que 4 établissements ont moins de 450 écoliers. Au niveau spatial, la majorité de ces effectifs se répartissent au sein d'un seul grand complexe par établissement. Seul l'établissement de Villamont fait exception: le nombre d'élève se divisant entre St-Roch (256 él.) et Villamont (194 él.). Les scénarios d'application Harmos entendent analyser une diminution du nombre de bassin de recrutement au niveau secondaire. Quelques esquisses allant dans cette direction ont été effectuées.



Esquisses d'établissements Harmos 9-11



Esquisses d'établissements Harmos 9-11

